



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TEPLÁRENSKÁ SOUSTAVA V BRNĚ – PAROPLYNOVÁ TEPLÁRNA ČERVENÝ MLÝN

HEATING PLANTS SYSTEM IN BRNO – STEAM-GAS HEATING PLANT ČERVENÝ MLÝN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SMOLINSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MICHAL JAROŠ, Dr.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Smolinský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Teplárenská soustava v Brně – paroplynová teplárna Červený mlýn

v anglickém jazyce:

Heating plants system in Brno – steam-gas heating plant Červený mlýn

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Požadavkem současné doby je maximální využití energetických zdrojů, zejména fosilních paliv. Tomu odpovídá souběžná výroba elektrické energie a tepla, která je podstatou teplárenství. Brněnské teplárenství, které patřilo ve svých počátcích ke světové špičce, zvyšuje v posledních letech v důsledku nových investic opět svou úroveň. Jednou z nich je i rekonstrukce teplárny Červený mlýn v r. 1999 na paroplynový cyklus.

Cíle bakalářské práce:

Zhodnoťte význam paroplynového cyklu v teplárenství a posuďte přínos rekonstrukce provozu Červený mlýn pro brněnskou teplárenskou soustavu i národní hospodářství jako celek. Proved'te rozbor energetické a ekonomické výhodnosti paroplynového cyklu, příp. porovnejte s jinými teplárenskými provozu.

Seznam odborné literatury:

Pavelek, M. a kol.: Termomechanika. Skripta FSI VUT. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2003.

Horlock, J. H.: Advanced Gas Turbine Cycles. Elsevier, 2003.

Kadrnožka, J., Ochrana, L.: Teplárenství. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001.

Firemní literatura Tepláren Brno a.s.

Internetové a jiné zdroje dle vlastního výběru studenta.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 26.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

První teoretická část rozebírá základní termíny v teplárenství, historii teplárenství a paroplynový cyklus. Druhá část se zaměřuje na brněnské teplárenství jako celek, následně přímo na provoz Červený mlýn. Na závěr posuzuje celkový přínos modernizace Červeného mlýnu.

ABSTRACT

The work consist of two main parts. The first part deals with the basic theoretical terms in heating, history of heating and steam-gas cycle. The second part focuses on the heating of Brno as a whole, then directly to the operation of the Červený mlýn. At the conclusion of judging the overall benefit of modernization Červený mlýn.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla, paroplynový cyklus, palivo, emise, brněnské teplárenství, teplárna Červený mlýn

KEYWORDS

Combined heat and power generation, combined cycle, fuel, emissions, Brno heating, thermal power station Červený mlýn

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SMOLINSKÝ, Petr. *Teplárenská soustava v Brně – paroplynová teplárna Červený mlýn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 40 s. Vedoucí práce doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Teplárenská soustava v Brně – paroplynová teplárna Červený mlýn vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, které tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 24. dubna 2013

.....

Petr Smolinský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Michalu Jarošovi, Dr. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce. Dále pak děkuji panu Ing. Václavu Klíčnickovi, výrobnímu řediteli tepláren Brno, za spolupráci a poskytnutí některých informací o teplárně Červený mlýn, která byla součástí práce.

OBSAH

1 Úvod	11
2 Teoretické základy teplárenství	12
2.1 Energie a kogenerace	12
2.2 Teplárenství	12
2.2.1 Historie a vývoj teplárenství v ČR	14
2.2.2 Současné teplárenství	14
2.3 Provozní parametry tepláren	15
2.3.1 Průběh zatížení	15
2.3.2 Teplárenský modul	16
2.4 Účinnost zdrojů	17
2.5 Technologie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla	17
2.6 Statistika kombinované výroby pro EU	18
2.7 Centralizované a decentralizované zásobování teplem	19
2.8 Teplárna s paroplynovým pracovním cyklem	20
2.8.1 Historie paroplynového cyklu	20
2.8.2 Popis paroplynového cyklu	20
2.8.3 Využití paroplynového cyklu v elektrizační a tepelné soustavě	21
2.9 Palivo	22
2.9.1 Druhy paliva pro KVET	22
2.9.2 Úspora paliva při KVET	23
2.11 Ekologie	24
2.11.1 Emisní částice	24
2.11.2 Emisní limit	24
3 Teplárenská soustava v Brně	25
3.1 Historie brněnského teplárenství	25
Historické milníky brněnského teplárenství [14]	25
3.2 Soustava zásobování tepelnou energií v Brně	26
4 Teplárna Červený mlýn	28
4.1 Popis zařízení	28
4.1.1 Řídicí systém	29
4.1.2 Plynová turbína V64.3A	29
4.1.3 Spalinový kotel	30
4.1.4 Parní protitlaká turbína GE 40	30
4.1.5 Akumulace tepla	31
4.1.6 Rozvodna 110 kV	31
4.2 Palivo	31
4.2.1 Zemní plyn	31
4.2.2 Lehký topný olej	32
4.5 Výroba elektřiny	32
4.6 Ekologie a emise	33
4.7 Hodnocení úspory paliva a energetické hodnocení	34
5 Závěr	36
Seznam použitých zdrojů	37
Seznam použitých zkratk	38
Seznam použitých symbolů	38
Seznam použitých obrázků	40
Seznam použitých tabulek	40
Seznam použitých příloh	40

1 Úvod

Spotřeba elektrické energie a užitného tepla neustále narůstá. Obě formy energie se mohou vyrábět odděleně, anebo za vhodných podmínek i sdruženě, kdy je velkou výhodou využití odpadního tepla.

Samotná výroba elektřiny je transformační proces, při němž dochází k nejvyšším energetickým ztrátám a její účinnost je určující z hlediska energetické náročnosti tvorby hrubého domácího produktu.

V roce 2010 činila průměrná účinnost výroby elektřiny v ČR při započtení vlastní spotřeby elektřiny v elektrárnách pouhých 35,5 %. Jinými slovy, téměř 2/3 energie v palivu dodané pro výrobu elektřiny byly zmařeny a převážně ve formě nízkopotenciálního tepla vypuštěny do atmosféry chladicími věžemi elektráren. Recyklací pouhé 1/5 nízkopotenciálního tepla z výroby elektřiny by bylo možné získat přibližně 119 PJ tepla, což představuje více než polovinu jeho veškeré spotřeby v obytných budovách a terciárním sektoru (školy, nemocnice, atd.) v České republice [1].

Se snižujícími zásobami fosilních paliv se stále hledají efektivnější způsoby jeho využití. Dále je snahou zvyšovat i účinnost samotných elektráren a tepláren. Významným požadavkem je i snižování investičních výdajů a provozních nákladů těchto zařízení. Roli hraje i šetrnost k životnímu prostředí. Jednou z cest, které mohou dopomoci k řešení těchto požadavků, je spojení parního cyklu se spalovací turbínou do tzv. paroplynového cyklu. Dalším významným důvodem pro využívání paroplynových tepláren jsou jejich dynamické vlastnosti.

Cílem této práce je shrnutí dosavadních informací o kombinované výrobě tepla a elektřiny, zvláště pak využití paroplynového cyklu při výrobě tepla a elektřiny. Na závěr je rozebírána samotná paroplynová teplárna Červený mlýn a posouzení jejího přínosu po modernizaci.

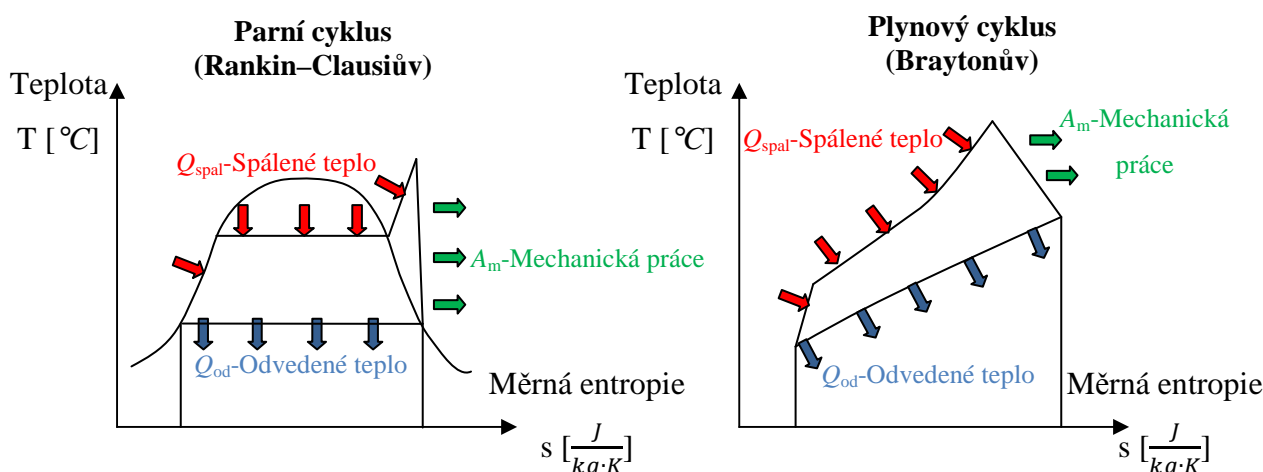
2 Teoretické základy teplárenství

2.1 Energie a kogenerace

Existují různé druhy energií od potenciální, kinetické, mechanické, chemické, elektrické až po tepelnou. Mezi těmito energiemi existuje vzájemný vztah, a to zákon o zachování energie. Ten říká, že v izolované soustavě je součet všech energií konstantní. Z toho plyne, že energie nevzniká ani se neztrácí, ale dochází pouze k její přeměně na jiný druh.

Zákon zachování energie pro tepelné procesy se nazývá první termodynamický zákon: „teplo lze měnit v práci a naopak“. Teplo je sice jednou z forem energie, avšak má jednu zvláštnost. Zatímco většinu jiných forem energie lze bezzbytku přeměnit na teplo, obrácený proces, tj. přeměnit zcela teplo na jinou formu energie, není možný [2].

V parních nebo plynových cyklech se využívá tepla uvolněného při spalování k transformaci na mechanickou práci. Tato transformace je ovšem omezená, což vyjadřuje druhý termodynamický zákon. Znázornění parního a plynového cyklu v T-s diagramech je na obr. 1.



Obr. 1 Znázornění parního a plynového cyklu v T-s diagramu

Pojem kogenerace se v dnešní době využívá stále častěji a je ekvivalentní k pojmu teplárenské výroby tepla a elektrické energie, někdy je též používán pojem kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET). Slovo kogenerace pochází z anglického slova „cogeneration“, který je především spojen s výrobou tepla a elektřiny s využitím u spalovacích motorů. V odborné literatuře se častěji pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla v teplárnách používá anglický název „Combined Heat and Power“ (CHP). V případě potřeby je možné u některých zařízení vyrábět kromě elektrické energie a tepla i chlad, v tom případě se jedná o trigeneraci.

2.2 Teplárenství

Teplárenství je průmyslový obor, jehož hlavním účelem je zásobování spotřebitelů teplem a elektřinou.

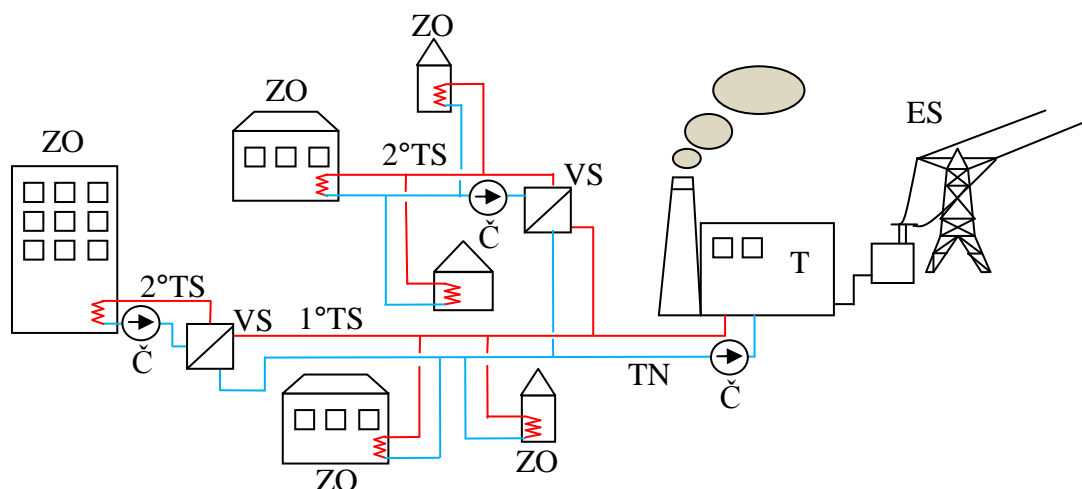
Teplárna je průmyslový závod, který se zabývá kombinovanou výrobou páry pro technologické účely, otop či ohřev topné vody a současně i výrobou elektrické energie. Samotnou výrobou elektrické energie se zabývá elektrárna a výrobou samotného tepla se zabývá výtopena. Základním typem tepláren jsou parní teplárny využívající Rankin – Clausiusův cyklus, jejichž hlavní částí je parní turbína. Dalším typem jsou teplárny s plynovou turbínou

pracující dle Braytonova cyklu a kombinací předcházejících dvou cyklů vzniká dosud nejmodernější teplárna paroplynová.

Původní princip teplárny spočívá ve výrobě vodní páry v parních kotlích. Tato pára je přiváděna do parní turbíny, která pohání elektrický generátor. Z vyšších parních odběrů turbíny může být vyvedena technologická pára a z nižších topná pára pro parní dodávky tepla nebo pro ohřev topné vody sloužící k vytápění [3].

Teplárny mohou být také vybaveny zařízením pro takzvaný ostrovní provoz, který v případě rozpadu elektrizační soustavy (tzv. „blackoutu“) zajistí nejnutnější zásobování vymezeného území elektřinou. Tato elektřina slouží k zajištění základních potřeb. Díky rozmístění tepláren po celém území republiky a jejich dodávce elektřiny do nižších napěťových hladin blíže spotřebitelům dochází ke snižování ztrát elektřiny v přenosové soustavě. Akumulace tepla v tepelných sítích nebo ve speciálních tepelných akumulátorech může dopomoci zdroji kombinované výroby k přizpůsobení provozu při poptávce po elektřině a poskytovat tzv. podpůrné služby pro vyrovnávání balance elektrizační soustavy (ES) [1].

Elektřina vyrobená v teplárně je dodávána do elektrizační sítě nebo do vlastní spotřebitelské soustavy provozovatele teplárny. Teplo je dodáváno pomocí rozvodných tepelných sítí ke spotřebitelům. Při větších vzdálenostech mezi teplárnou a místem zásobovaným teplem spojuje teplárnu a rozvodnou tepelnou síť tzv. tepelný napáječ (viz obr. 2). Způsob dopravy tepla z teplárny může být dvojím způsobem, buď prostřednictvím topné vody, což je nejvyužívanější způsob, nebo prostřednictvím páry. Při dodávkách tepla pomocí teplotné vody má tepelná síť a tepelný napáječ nejméně dvě potrubí (přívodní a vratné). V teplárně nebo i na trase, zvláště když jsou delší, se mohou nacházet čerpací stanice, které slouží k cirkulaci topné vody (viz obr. 2)[2].



Obr. 2 Schéma složitější teplárenské horkovodní soustavy (podle [2])

T-teplárna, TN-tepelný napáječ, 1°TS-primární tepelná síť, 2°TS-sekundární tepelná síť, VS-výměnková stanice, Č-cirkulační čerpadlo, ZO-objekt zásobovaný teplem, ES-elektrizační soustava

V rozsáhlých teplárenských soustavách je teplota vody v přívodní síti zpravidla okolo 130 °C. Na konci tepelné sítě bývají výměnkové stanice, které slouží k tomu, aby horká voda z primární tepelné sítě ohřívala vodu v sekundární větvi. V případě, kdy je teplo dodáváno prostřednictvím páry, má rozvodná síť dvě potrubí, parní o větším průměru (např. 500 mm) a kondenzační o menším průměru (např. 150 mm). Pára vedená prostřednictvím těchto parovodů slouží zpravidla pro průmysl, který ji využívá pro technologické účely (např. sušení). Od počátku teplárenství se zachovaly parní sítě především v průmyslových městech jako je Brno, České Budějovice, Přerov [2].

2.2.1 Historie a vývoj teplárenství v ČR

Česká republika se vyznačuje velkým stupněm urbanizace a industrializace s velkým podílem energeticky náročných odvětví, jako je průmysl. To má za následek velké nároky na zajištění dostatečného množství energie. Teplo, které také patří mezi nejdůležitější formy energie, využíváme nejen ve výrobních procesech, ale vzhledem k našim klimatickým podmínkám i pro vytápění, a to nejméně po šest měsíců v roce.

Tak, jak se postupem času rozvíjela infrastruktura země, rozvíjely se i různé způsoby zásobování teplem. Od původního lokálního vytápění v jednotlivých místnostech se přešlo k výrobě tepla v malých kotelnách. Současně s tím vznikaly první výtopny a elektrárny, které prostřednictvím nově vystavěných parních sítí dodávaly páru především pro průmysl.

Počátek 19. století v českých zemích předznamenal větší využití páry z parních strojů pro výrobní procesy a vytápění textilních továren, papíren, cukrovarů atd. První stejnosměrná elektrárna v Praze-Karlíně zahájila dodávku páry o tlaku 0,35 MPa pro školu a radnici již v roce 1895. Elektrárna v Holešovicích dodávala přibližně od roku 1900 menší množství páry pro spotřebitele v okolí. V roce 1919 vznikla první městská teplárna v Ústí nad Labem [2].

V roce 1930 byla v Brně uvedena do provozu na tehdejší dobu nejmodernější teplárna s práškovými kotli v Evropě. V Československu si vedoucí postavení v teplárenství udržovala teplárna Holešovice a teplárna Brno. Obě tyto teplárny se na tehdejší dobu vyznačovaly poměrně velkým podílem výroby elektřiny s progresivním rozvodem tepla [2].

České teplárenství, které se velmi rychle rozvíjelo a bylo na velmi dobré technické úrovni, bylo ovšem založeno na dodávce tepla formou páry. To vedlo později k obtížím, spočívajících v tom, že centra měst byla vybavena parními rozvody tepla na vysoký tlak páry (až 1,4 MPa). Tento velký odběr páry citelně snižoval podíl elektřiny získané při kombinované výrobě elektřiny a tepla. Proto byla v městech nutná rekonstrukce parních rozvodů, sloužících pro vytápění, na horkovodní. Teplárenství zaznamenalo růst i po druhé světové válce. Dodávky tepla vyžadovala sídlištní bytová výstavba s velkou hustotou obyvatelstva a energeticky náročný průmysl (těžké strojírenství, hutnictví atd.). Byla velká snaha po dostupnosti energie v neomezeném množství pro všechny obyvatele, což vedlo k rozvoji teplárenství a systému zásobování teplem. Avšak odvrácenou stranou bylo zanedbávání inovací, rekonstrukcí a efektivnějšího řízení. Výsledkem toho bylo značně rozšířené centralizované zásobování teplem, ale i jeho nízká technická úroveň [2].

2.2.2 Současné teplárenství

V posledních 20 letech prošlo teplárenství velmi podstatnými změnami a došlo k výraznému zvýšení jeho technické a energetické úrovně. Byly postaveny nové teplárny s vysokým podílem výroby elektřiny za použití spalovacích motorů a turbín. Původní teplárenské zdroje byly modernizovány a došlo k jejich vylepšení nejen z hlediska energetického, ale i z hlediska ekologického. Zde může být příkladem podstatné snížení vypouštění tuhých znečišťujících látek (TZL), SO_2 a NO_x . Postupně se výrazně zlepšila úroveň tepelných sítí, pomocí nových rozvodů na bázi předizolovaných potrubí, což dopomohlo ke snížení tepelných ztrát v tepelných rozvodech. V Brně byl například vybudován experimentální úsek s vakuovou izolací. Zkvalitnila se úroveň řízení celých teplárenských soustav. V posledním desetiletí se začaly objevovat i mikroteplárny s menšími plynovými turbínami a kogenerační zařízení na bázi palivových článků. Jejich rozvoji však brání vysoká cena článků.

V současné době pokrývají teplárny s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny v ČR okolo 15 % celkové potřeby elektřiny [1]. Žádoucí je však podstatné zvýšení, neboť při kombinované výrobě elektřiny a tepla dochází, zejména u tepláren s vyšším podílem vyráběné elektřiny, k podstatné úspoře paliva oproti oddělené výrobě.

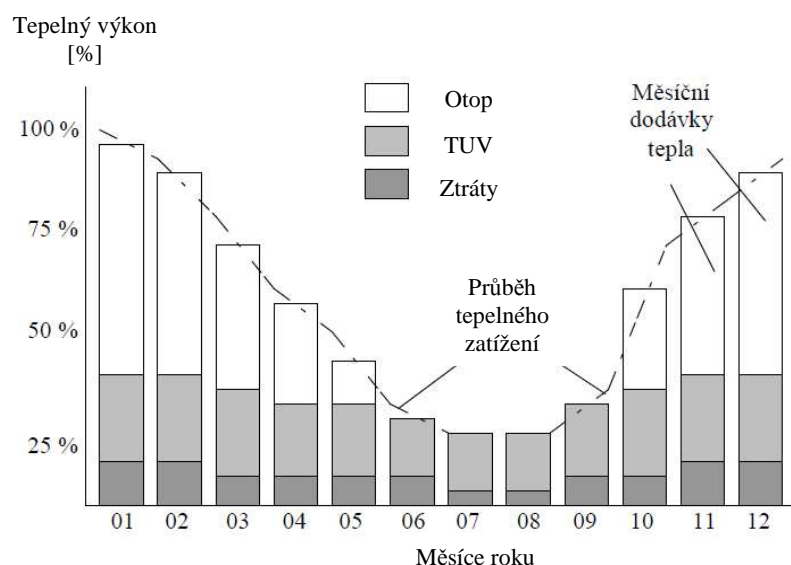
2.3 Provozní parametry tepláren

2.3.1 Průběh zatížení

Důležitou roli při navrhování teplárenských soustav hrají veličiny, které jsou časově proměnné v průběhu dne, týdne, roku nebo po celou životnost zařízení. V teplárenství jsou těmito veličinami například časový průběh venkovních teplot, průběh tepelného zatížení a při kombinované výrobě tepla a elektřiny také průběh elektrického zatížení.

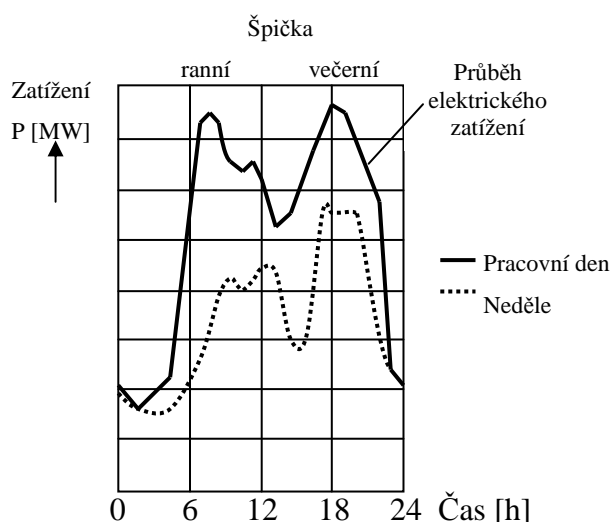
2.3.1.1 Časový průběh zatížení

Průběh zatížení v závislosti na čase (chronologická čára) se nejčastěji znázorňuje na diagramu denního zatížení. Průběh tohoto zatížení se v teplárenství týká především



Obr. 3 Diagram celkové roční potřeby tepla [4]

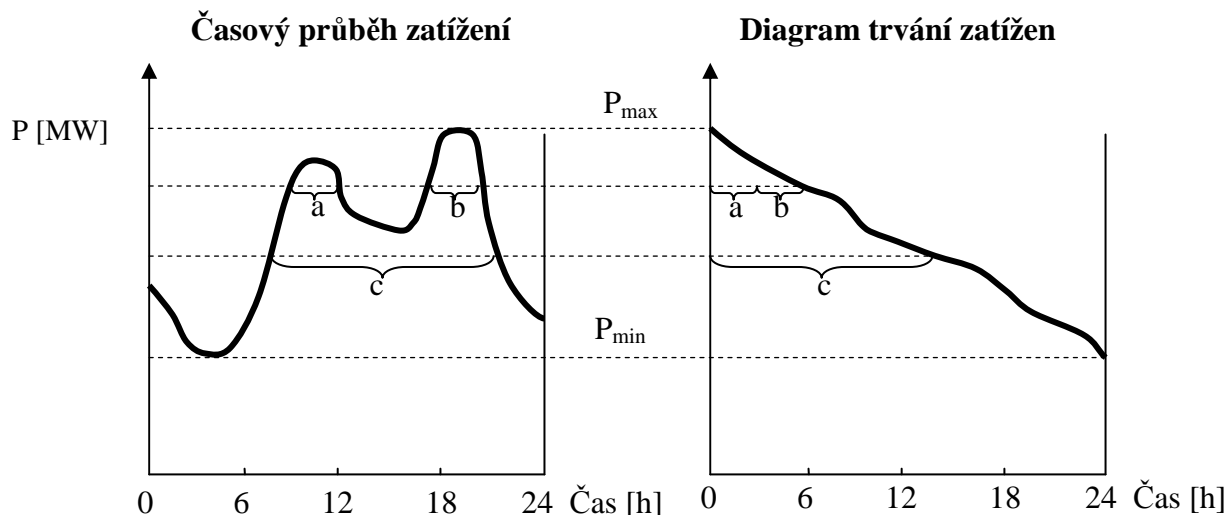
Jak je patrné z grafu zatížení elektrizační soustavy, tak průběh zatížení neprobíhá rovnoměrně. V nočních hodinách bývá spotřeba zpravidla nižší, mezitím ráno vzniká špička, způsobená zahájením pracovního provozu, odpoledne nastává pokles a večer vzrůst v tzv. večerní špičce. Vliv na takovýto průběh časového zatížení má především směnný provoz v průmyslové výrobě a spotřeba domácností. Opomenout nelze ani v období zimy tzv. světelnou špičku, která se projeví celkovým navýšením spotřeby elektrické energie.



Obr. 4 Diagram denního zatížení elektrizační soustavy [2]

2.3.1.2 Diagram trvání zatížení

Pro projektové účely je výhodnější než chronologický průběh zatížení tzv. diagram trvání zatížení (též čára trvání zatížení). Tento diagram udává, po jakou dobu bylo zatížení dané nebo větší. Diagram může být denní, týdenní či roční. Sestrojení denního diagramu trvání zatížení z časového průběhu zatížení je patrný z obr. 5. Plocha pod diagramem trvání se rovná dodané energii [2]. Pomocí tohoto grafu zatížení soustavy je pak možno rozhodovat o tom, jak výkonný energetický zdroj je v případě nedostatku pokrytí energie zapotřebí vybudovat, aby soustava byla stabilní a zároveň nebyla předimenzovaná.



Obr. 5 Sestrojení denního diagramu trvání zatížení [2]

2.3.2 Teplárenský modul

Ačkoli se pro teplárenský modul používají různé symboly a ne zcela shodné definice, je podstata tohoto ukazatele je zřejmá ze vztahu (1). Teplárenský modul pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET) je definován jako podíl vyrobené elektřiny ku vyrobenému užitečnému teple v zařízení za určité časové období.

$$\sigma = \frac{E_{KVET}}{Q_{už KVET}} \quad (1)$$

σ - teplárenský modul; E_{KVET} - elektřina vyrobená v procesu KVET; $Q_{už KVET}$ - teplo vyrobené v procesu KVET

Hodnoty σ jsou dány konstrukcí a typem technologie KVET. Vlivem změny provozu (tj. okamžitá změna elektrického a tepelného výkonu) se může docílit různých hodnot σ . V tab. 1 jsou uvedeny velikosti teplárenských modulů pro různé technologie KVET.

Tab. 1 Hodnota modulu teplárenské výroby pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla [5]

Druh teplárny	Modul teplárenské výroby elektřiny
Teplárna s parní turbínou	0,10 - 0,45
Teplárna se spalovací turbínou	0,30 - 0,80
Teplárna se spalovacím motorem	0,65 - 0,80
Paroplynová teplárna	0,90 - 1,40

2.4 Účinnost zdrojů

O tepelných obězích je všeobecně známo, že účinnost cyklu je tím větší, čím vyšší je teplota tepla do cyklu vstupujícího a čím nižší je teplota tepla z cyklu vystupujícího. Horní teplota je limitována zpravidla mechanickými vlastnostmi konstrukčního materiálu nebo pracovní látkou daného stroje. Spodní teplota je pak dána možnostmi odvedení tepla do okolí, zpravidla teplotou venkovního vzduchu nebo chladicí vody (u parních cyklů). Tyto teploty lze ovlivnit různými způsoby, např. přehříváním páry u parních oběhů, stupňovým spalováním a mezichlazením u oběhů spalovacích turbín apod.

Charakteristickým znakem pro teplárnu, je s jakou tepelnou (termickou) účinností dokáže daný cyklus pracovat. U tepláren je možno dělit účinnosti na dva typy. První z nich je účinnost výroby elektrické energie. Ta je dána podílem elektřiny vyrobené ve zdroji (E_{KVET}) ku celkové spotřebě tepla ve spáleném palivu ($Q_{spal\ KVET}$).

$$\eta_{el\ KVET} = \frac{E_{KVET}}{Q_{spal\ KVET}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Druhým typem je účinnost výroby užitečného tepla, která představuje podíl vyrobeného užitečného tepla ku teplu vzniklém spálení paliva.

$$\eta_{q\ KVET} = \frac{Q_{už\ KVET}}{Q_{spal\ KVET}} \cdot 100 \quad (3)$$

Celková účinnost zdroje KVET vznikne sloučením předešlých dvou účinností.

$$\eta_{celk\ KVET} = \left(\frac{E_{KVET} + Q_{už\ KVET}}{Q_{spal\ KVET}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

E_{KVET} - Elektřina vyrobená ve zdroji KVET; $Q_{spal\ KVET}$ - Spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET; $Q_{už\ KVET}$ - Užitečné teplo vyrobené ve zdroji KVET

2.5 Technologie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla

Technologie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla jsou značně různorodé, jak co do použitého zařízení, tak i ve velikosti jmenovitého výkonu. Elektrický výkon největších zařízení pro KVET dosahuje až stovek megawattů, zatímco u nejmenších zařízení to jsou pouhé desítky, někdy až jednotky kilowattů (např. u mikrokogenerace) [6]. Přehled některých technologií pro kombinovanou výrobu je uveden v tab. 2.

Tab. 2 Přehled technologií pro KVET [6]

Technologie kombinované výroby	Obvyklý rozsah elektrických výkonů [MW _e]
Paroplynové cykly	5,0 – 450
Samostatné plynové spalovací turbíny	0,2 – 250
Odběrová parní turbosoustrojí	25 – 200
Protitlaká parní turbosoustrojí	3,0 – 60
ORC (organický Rankinův cyklus) moduly	0,2 – 5
Plynové motory	0,02 – 4,5
Palivové články	0,005 – 2,0
Plynové mikroturbíny	0,010 – 0,25
Stirlingův motor	0,001 – 0,03

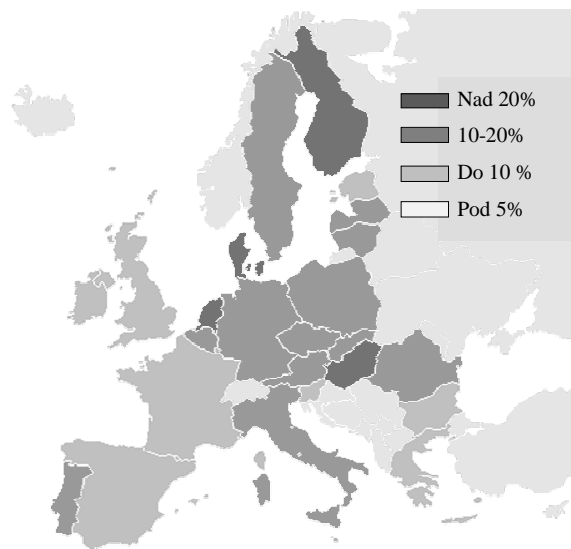
Dle účelu využití lze zdroje tepla a elektřiny rozdělit podle jejich zapojení do systému zásobování elektrickou a tepelnou energií takto:

- a) Základní zdroje slouží k pokrytí větší části denního diagramu zatížení. Pro jejich výstavbu je obvykle zapotřebí vysokých investičních výdajů, ale při provozu mají nízké provozní náklady. Do těchto zdrojů patří jaderné elektrárny, průtočné vodní elektrárny a teplárny s protitlakými turbínami.
- b) Pološpičkové zdroje pokrývají pološpičkovou oblast denního diagramu zatížení a jsou schopny pomalé regulace, často v omezeném rozsahu. Pro toto pokrytí jsou vhodné především uhelné elektrárny, teplárny s fluidními kotli, paroplynové elektrárny a teplárny.
- c) Špičkové zdroje jsou určeny k pokrytí špičkové oblasti zatížení v denním diagramu. Tyto zdroje se vyznačují rychlou a pružnou schopností regulace ve velkém výkonovém rozsahu. Do této skupiny je možno zařadit do jisté míry paroplynové teplárny a elektrárny, ale především vodní elektrárny.

2.6 Statistika kombinované výroby pro EU

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla našla svoji podporu i v evropské legislativě, a to ve Směrnici Evropského parlamentu a Rady EU 2004/8/ES o podpoře KVET [4]. Statistiku vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla pro EU a další země zpracovává evropský statistický úřad Eurostat. Na obr. 6 je ukázka podílu KVET při výrobě energie v zemích EU.

Podíl elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla dosáhl v roce 2009 ve 27 zemích EU průměrně 11,4 %. Situace v jednotlivých zemích se však značně lišila v rozpětí od 3 % v Řecku po 45 % v Dánsku, které se pyšní nejrozvinutějším teplárenstvím v Evropě s cílem dosáhnout až 70 %. Česká republika s 13,4 % uzavírala první desítku zemí s nejvyšším podílem vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla. Velmi odlišný je v různých zemích také palivový mix využitý v kombinované výrobě elektřiny a tepla. Zatímco Dánsko, Česká republika, Polsko, Estonsko, Lotyšsko, Rumunsko nebo Bulharsko sází především na tuhá paliva, Belgie, Velká Británie, Nizozemí, Španělsko a Francie preferují zemní plyn. I přesto využívání plynu při kombinované výrobě v ČR není nikterak zanedbatelné, zejména na jižní Moravě. Nejvyšší podíl elektřiny z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla vyrobené z obnovitelných zdrojů energie (zejména biomasy) vykazuje Švédsko, plných 73 % [7].



Obr. 6 Podíl elektřiny z KVET na celkovém vyrobeném množství v EU [7]

2.7 Centralizované a decentralizované zásobování teplem

Při decentralizovaném (lokálním) způsobu je teplo do prostor spotřebitele dodáváno buď pomocí individuálních topných těles, nebo pomocí kotlů ústředního vytápění. Individuální topná tělesa jako jsou kamna, dodávají teplo do jediné místnosti. Při ústředním vytápění (vodní, parní, teplovzdušné) se teplo dodává do více místností téhož objektu z jednoho tepelného zdroje. Hlavním představitelem decentralizované soustavy jsou zpravidla domácnosti na vesnicích [5].

Centralizované zásobování teplem je charakterizováno existencí více či méně rozsáhlé tepelné sítě, tzv. soustavy zásobování tepelnou energií (SZTE). Ta může spojoval jeden nebo více zdrojů tepla s větším počtem navzájem oddělených objektů. Na rozdíl od přenosu elektrické energie neexistuje pro přenos tepelné energie systém s plošnou celostátní působností. Soustava zásobování tepelnou energií je účinná i při poklesu teploty nosného média, proto nehrozí rozpad soustavy, jako může nastat u elektrizační soustavy. Velkou výhodou při velkokapacitní výrobě je snižování celkových nákladů s rostoucími požadavky na produkci. Proto je hlavním cílem umísťovat tato energetická zařízení blízko míst velkého odběru (továrny) nebo blízko primárního zdroje. Hlavním představitelem centralizované soustavy jsou města s vysokou hustotou osídlení, příkladem mohou být rozsáhlá sídliště s panelovými domy [5].

Dálkové vytápění v České republice vyrábí teplo pro 1,48 milionu domácností buď v samotné, nebo kombinované výrobě tepla s elektřinou [8].

Výhody SZTE

- dosažení větších tepelných výkonů a uplatnění kogeneračních zdrojů
- zdroje mohou mít vysoké komíny, které dopomohou k rozptýlení emisí do širokého okolí
- zdroje mohou být umístěny na okrajích měst
- při použití uhlí jako paliva je možno dosáhnout ekologicky i ekonomicky dobrých výsledků

Nevýhody SZTE

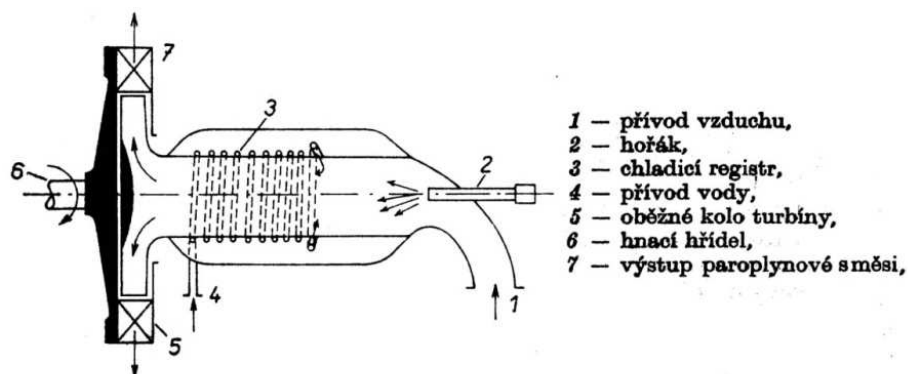
- výstavba nákladné tepelné sítě
- vznik tepelných ztrát v rozvodné síti
- údržba tepelných sítí
- potřeba čerpací práce pro transport tepelné energie se v primárních sítích SZTE využívá pára nebo voda. Bez sporu nejvýhodnějším dopravním médiem je voda. Moderní SZTE by měla využívat páry jen pro horkou vodu. Pokud se jedná

technologické účely, které nelze nahradit o vytápění nebo přípravu teplé vody, mělo by se využívat výhradně horkovodních rozvodů, které mají menší tepelné ztráty, jsou lépe regulovatelné a přesněji se dá měřit spotřeba. Většina původních tepelných sítí je zastaralá, se špatnou izolací, z čehož plynou velké tepelné ztráty. U parních rozvodů mohou tyto ztráty v letním období činit až 50 % [5].

2.8 Teplárna s paroplynovým pracovním cyklem

2.8.1 Historie paroplynového cyklu

První pokus o sestavení paroplynového cyklu (PPC) je přisuzován ruskému námořnímu důstojníkovi P. D. Kuzminskému, který v letech 1892 až 1900 sestrojil první směšovací paroplynové zařízení pro pohon lodí. Spalovací komora, v níž byl spalován kerosin, byla chlazená vodou o tlaku 5 MPa. Po seškracení ohřáté vody byla vzniklá pára směšována se spaliny a tato směs byla zaváděna do turbíny. Účinnost zařízení dosahovala přibližně 3 % [9].



Obr. 7 Paroplynové zařízení P. D. Kuzminského [9]

Technologie paroplynových oběhů se začala rozvíjet v návaznosti na vývoj leteckých proudových motorů, který započal koncem 30. let minulého století. Od konce 80. let zaznamenávají paroplynové oběhy rozkvět, podněcený snahou o ekologizaci průmyslové energetiky a rostoucími ověřenými celosvětovými zásobami zemního plynu [10].

2.8.2 Popis paroplynového cyklu

Paroplynový cyklus je moderním, ve světě velmi užívaným a osvědčeným zdrojem výroby elektrické energie. Samotný výraz „paroplynový cyklus” je zjednodušený, neboť z technického hlediska se jedná o dva oběhy (parní a plynový) vzájemně propojené spalínovým kotlem. Spálením patřičného paliva ve spalovací turbíně vznikají spaliny, které roztáčí spalovací turbínu, a ta následně uvádí do pohybu elektrický generátor (vyrábějící elektrický proud). Zbytková energie spalin vystupujících z plynové turbíny vstupuje do spalínového kotle, který slouží k výrobě vysokotlaké páry, která je dále vedena do parní turbíny. Parní turbína pohání další generátor výroby elektrické energie. Pára z parní turbíny je dále využívána pro dodávky užitného tepla.

V paroplynovém cyklu jsou možné i některé modifikace. Především může být plynová turbína vybavena tzv. by-passovým komínem pro možnost samostatného provozu plynové části. To umožňuje částečnou nebo úplnou nezávislost na provozu parní části.

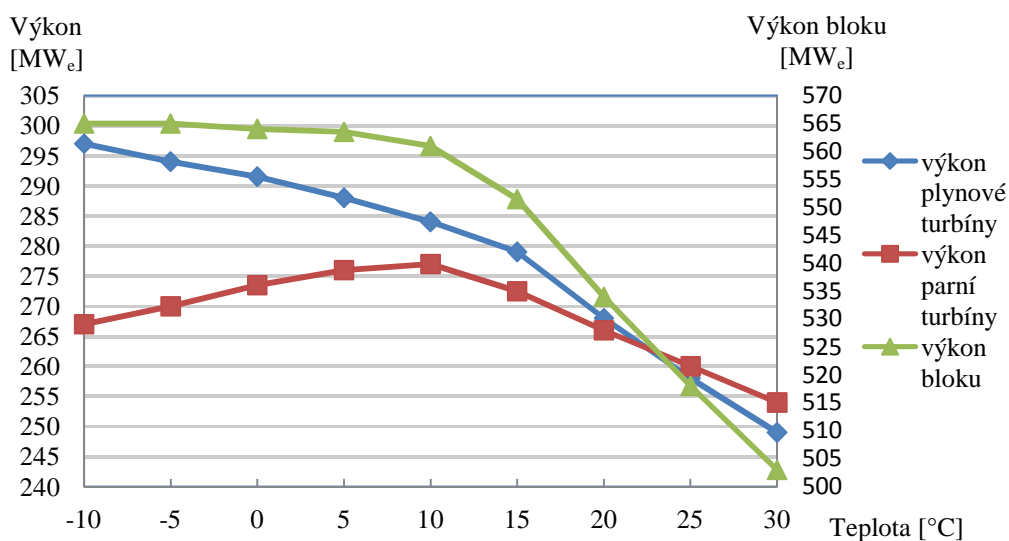
Paroplynový cyklus dosahuje ve srovnání s uhelnými bloky vyšší tepelné účinnosti. Doba výstavby paroplynového zařízení se pohybuje v rozpětí 30 – 40 měsíců (dle velikosti zdroje),



Obr. 8 Pohled na otevřenou spalovací turbínu [10]

což je výrazně méně než v případě klasických uhelných nebo jaderných elektráren. Z důvodu složitosti paroplynových cyklů jsou zpravidla budovány jako výkonově větší zdroje, řádově v desítkách až stovkách MW_e. Díky krátké době realizace a vysoké tepelné účinnosti jsou paroplynové teplárny výrazně zvýhodněny oproti ostatním zdrojům na fosilní paliva. Cenou za tyto výhody je potřeba ušlechtilého a relativně drahého paliva pro provoz spalovací turbíny. Nejčastěji se paroplynové zdroje staví na zemní plyn, méně často na olej. Jistou perspektivu do budoucna nabízejí paroplynové zdroje s integrovaným zplynováním uhlí, které patří k tzv. technologiím čistého uhlí (Clean Coal Technologies) [10].

Chod paroplynového cyklu ovlivňují okrajové podmínky, které limitují samotnou výkonnost cyklu. Mezi tyto podmínky patří především teplota okolního vzduchu, nadmořská výška a relativní vlhkost. Nejvýrazněji se projevuje vliv teploty, kdy se vzrůstající teplotou okolí výrazně klesá výkon plynových turbín (viz obr. 9) [10].



Obr. 9 Graf závislosti výkonu na teplotě okolí [10]

2.8.3 Využití paroplynového cyklu v elektrizační a tepelné soustavě

Pro ekonomické pokrytí zatížení elektrizační soustavy je třeba instalovat různé typy elektráren a tepláren. Ty by se měly lišit výkonem, investičními výdaji, ročním využitím, používanými palivy, dynamickými vlastnostmi atd. Širokou škálu těchto požadavků je možno realizovat pomocí vhodně navržených paroplynových tepláren.

Paroplynové cykly jsou vysoce flexibilní zdroje, které jsou schopny stabilizovat elektrizační soustavu a rychle tak vyrovnávat spotřebu elektřiny s její výrobou. Jejich provozem se vykrývají špičky ve spotřebě elektřiny. Tento zdroj může být připojen k síti do několika desítek minut po spuštění. Rychleji to zvládnou pouze vodní elektrárny (přečerpávací, průtočné).

V podmínkách ČR, kde vhodné palivo pro provoz plynových turbín je zemní plyn nebo lehký topný olej, které jsou výrazně dražší než ostatní paliva v energetice používaná, je z ekonomických důvodů vhodné upřednostňovat parní protitlaké turbíny. Důvodem instalace odběrových nebo kondenzačních parních turbín pak nebývají teplárenské účely, ale jsou motivovány schopností nabízet služby elektrizační soustavě. Přehled účinností paroplynového cyklu pro různé typy koncového provedení parní části je uveden v tab. 3 [4].

Tab. 3 Rozsah běžně dosahovaných účinností PPC [4]

Paroplynový cyklus	S protitlakou parní turbínou	S odběrovou parní turbínou	S kondenzační parní turbínou
Účinnost výroby el. energie [%]	40-45	46-50	51-53
Účinnost výroby užit. tepla [%]	38-46	10-30	-
Celková účinnost PPC [%]	83-86	60-76	51-53

Provozní vlastnosti PPC budou v největší míře předurčeny již zmiňovanou volbou typu parní turbíny. Zde se lze orientovat buď na teplárenské řešení, tj. zvolit parní protitlakou turbínu, pak dojde k dosažení maximální celkové účinnosti, byť při menším podílu výroby elektřiny a omezeném rozsahu poskytovaných systémových služeb (v řádu 10 až 30 % výkonu pouze plynové turbíny), nebo se orientovat na elektrárenské řešení, tj. zvolit kondenzační parní turbínu. Pak je možno dosáhnout většího podílu výroby elektřiny a širšího rozsahu systémových služeb nabízených elektrizační soustavě, ovšem za cenu nižší celkové provozní účinnosti [4].

První, teplárenské řešení předurčuje PPC k provozu v základním zatížení pro dodávky tepla v závislosti na venkovní teplotě s vyšší dobou využití instalovaného výkonu. Druhé, elektrárenské řešení vyžaduje spíše občasný, špičkový provoz zdroje dle potřeb elektrizační soustavy (respektive dle aktuálních podmínek na trhu s elektrickou energií). Řešení mezi těmito dvěma krajními polohami, tj. s odběrovou parní turbínou, bude v našich podmínkách méně vhodná, jelikož je velice těžké současně vyhovět protichůdným požadavkům na plynulé dodávky tepla při celkově vysoké účinnosti a požadavkům na nárazový provoz dle potřeb [4].

2.9 Palivo

Volba paliva pro kogenerační jednotku je velmi důležitá. Provozovatel musí zohlednit dostupnost paliva, cenu, náklady na dopravu a skladování, nutnost úpravy, náklady na likvidaci nespalitelných složek a mnohé další faktory. Volba je také mnohdy omezena ekologickými a ekonomickými požadavky kladenými na kogenerační jednotku nebo její samotnou technologii. Někdy naopak je výchozím bodem palivo v dané lokalitě, a pak je snahou najít co nejvhodnější energetický zdroj.

Zdrojem primární energie v podmínkách České republiky je především hnědé uhlí, černé uhlí, zemní plyn nebo mazut, méně pak biomasa. Česká republika pokrývá z vlastních zdrojů necelých 68 % spotřeby, zbytek je dovážen [8].

2.9.1 Druhy paliva pro KVET

2.9.1.1 Tuhá paliva

Mezi hlavní představitele tuhých paliv patří uhlí. Hořlavá část paliva se skládá z uhlíku, vodíku a síry. Jejich oxidací (spálením) se uvolňuje teplo. Nevýhodou je potřeba velkého objemu paliva pro získání poměrně malého obsahu energie obsaženého v palivu. Výhodou je nízká cena a dobrá dostupnost.

2.9.1.2 Kapalná paliva

Základní surovinou pro výrobu kapalných paliv je ropa. Destilací ropy se získávají různé frakce odlišné bodem varu. Mezi tyto frakce patří extralehké, lehké a těžké topné oleje. Těžkým topným olejem se také někdy říká mazut nebo topná nafta. Kapalná paliva mají vysoký energetický obsah. Při jejich optimálním spalování vzniká méně emisí než při spalování tuhých paliv. Nevýhodou kapalných paliv jsou vysoké nároky na skladování z hlediska bezpečnosti, např. pro případ požáru [2].

2.9.1.3 Plynná paliva

Mezi plynná paliva patří každý plyn, který obsahuje hořlavé složky jako je vodík, plynné uhlovodíky, oxid uhelnatý a případně jiné složky. Výhodou plynného paliva je dokonalé promísení vzduchu s plynem před spalováním. Snadnou regulací dodávky vzduchu lze docílit omezení vzniku nespalitelných částic ve formě sazí. Plynné palivo nemá konstantní objem, je závislý na teplotě a tlaku. Proto se přepočítává na normální fyzikální podmínky, což je teplota 0 °C a tlak 101,325 kPa. Plynná paliva (zemní plyn) v sobě obsahují minimální množství sloučenin síry a dusíku, což vede ke snížení produkce škodlivých látek do ovzduší. Složkou plynu může být vlhkost, která podporuje korozi, proto je žádoucí obsah vlhkosti snižovat. Při spalování paliva je důležité využívat dokonalé spalování s dostatečným přívodem kyslíku. Při nedokonalém spalování je tepelný efekt reakce přibližně třetinový [2].

Nejčastěji používaná plynná paliva:

- Zemní plyn je přírodní plyn vyznačující se velkým obsahem metanu. Rozeznáváme zemní plyny ropného nebo uhelného původu.
- Koksárenský plyn vzniká při výrobě koksu z černého uhlí. Odsířený a vyčištěný koksárenský plyn používaný v plynárenských soustavách se nazývá svítiplyn.
- Vodní plyn vzniká rozkladem vodní páry a žhavého koksu na vodík a oxid uhelnatý.
- Generátorový plyn se vyrábí zplyňováním tříděného černého nebo hnědého uhlí směsí vzduchu a malého množství vodní páry.
- Vysokopecní plyn vzniká redukčním procesem ve vysokých pecích nedokonalým spálením koksu a uvolněním oxidu uhličitého z vápence.

Porovnání těchto paliv je v tab. 4.

Tab. 4 Složení a výhřevnost některých plynných paliv [11]

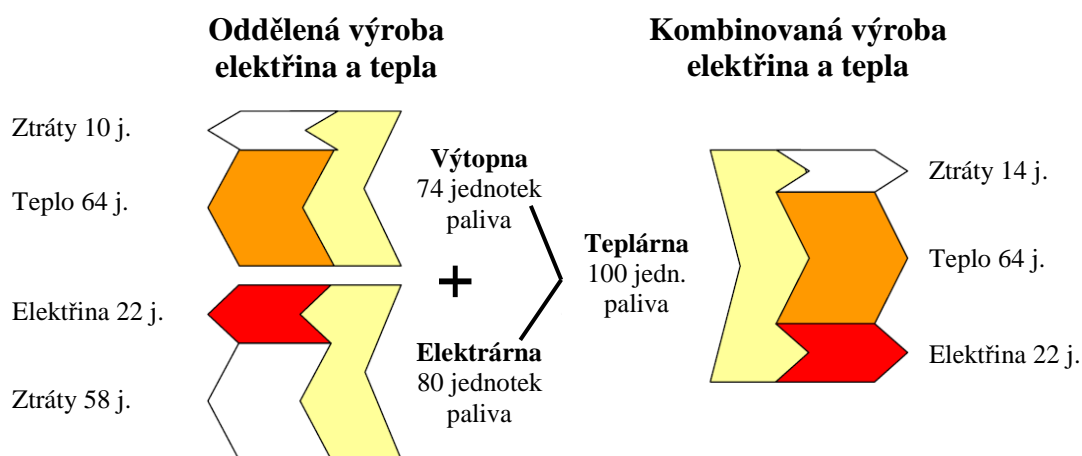
PLYN	Výhřevnost [MJ/m ³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CH [%]	CO [%]	H ₂ [%]	CH ₄ [%]	N ₂ [%]	Zbytek [%]
Zemní plyn	33,5	0,1	-	0,7	-	-	98	1,2	-
Koksárenský plyn	16,3	2,3	0,8	-	6,8	57,5	22,5	7,8	2,4
Vodní plyn	10,5	6,3	0,2	-	3,8	51,0	0,5	4,0	4,0
Generátorový plyn	5,2	5,2	0,2	-	28,1	13,3	0,6	52,4	0,2
Vysokopecní plyn	3,9	10,5	-	-	28,0	2,7	0,3	58,3	-

2.9.2 Úspora paliva při KVET

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla v teplárnách výrazně zvyšuje účinnost využití primárního paliva oproti oddělené výrobě elektřiny. Zatímco při výrobě elektřiny v kondenzační elektrárně je větší část energie paliva odvedena ve formě nízkopotenciálního tepla prostřednictvím páry z chladicích věží do okolí, v případě kombinované výroby v teplárně je toto teplo dále využito pro dodávku tepla do soustavy zásobování tepelnou energií. Tím může dojít k úspoře až 1/3 primárního paliva. Nižší spotřebu primárních energetických zdrojů v KVET lze posoudit z obr. 10 [5].

Úspora paliva vychází z účinnosti jednotlivých energetických centrál. Pro výrobu elektrické energie v elektrárně se uvažuje účinnost 38 %, pro výtopnu 86 % a celková účinnost teplárny 87 %. Při přeměně 100 jednotek paliva v teplárně se 22 jednotek přemění na elektrickou energii, 64 jednotek na užitečné teplo a zbylých 14 jednotek jsou ztráty.

Při oddělené výrobě ve výtopně a kondenzační elektrárně se uvažuje, kolik jednotek paliva je nutné spálit, aby se docílilo stejného množství jednotek přeměněného paliva na užitečnou elektřinu a teplo jako bylo v teplárně. Ve výsledku je zapotřebí při oddělené výrobě spálit 154 jednotek paliv. Úspora pak činí 35 %.



Obr. 10 Znáznornění úspory paliva při KVET [4]

2.11 Ekologie

2.11.1 Emisní částice

Emisní částice je základní jednotka znečišťující látky vystupující ze zdroje do ovzduší. Emisní částice je možno dělit na tuhé znečišťující látky (TZL), kam patří saze, popel či prach, a plynné látky, jejichž hlavními představiteli jsou oxidy síry, dusíku a uhlíku. Saze vznikají nedokonalým spalováním tuhých látek obsažených v palivu při nedostatečném přívodu vzduchu. Uhlí je ve srovnání se zemním plynem poměrně levnou a energeticky spolehlivou surovinou. Na druhé straně, i přes používání stále modernějších technologií při jeho spalování vzniká o 70 % více emisí CO_2 než při spalování zemního plynu [11].

Ke snižování obsahu tuhých znečišťujících látek přispívá správné spalování paliva a montáž různých filtrů, které je odstraní ze spalin před vstupem do ovzduší. Pro eliminaci emisí SO_x se používá tzv. odsiřování. Docílit nižší koncentrace NO_x lze snížením spalovací teploty nebo redukcí vzniklých emisí NO_x ve spalinách. Množství emisí CO_2 závisí na složení paliva. Snížení produkce CO se dá docílit dodržováním přebytku vzduchu pro spalování. Nejeefektivnějším způsobem snížení emisí je zvyšování účinnosti přeměny paliva na energii.

2.11.2 Emisní limit

Emisní limit představuje maximální povolenou koncentraci znečišťujících látek vystupujících ze zdroje znečištění. Výše emisních limitů je dána zákonem o ovzduší. Pro stacionární zdroje, jako jsou teplárny či elektrárny, jsou stanoveny specifické limity. Tyto limity jsou závislé na výkonu zdroje a typu používaného paliva. Účinným nástrojem pro regulaci produkce emisí se stalo vydávání povolenek pro emise CO_2 . Při překročení limitů musí provozovatel snížit produkci, případně nakoupit povolenky od jiného provozovatele, který svůj limit nevyčerpal [11].

3 Teplárenská soustava v Brně

O zajištění dálkového vytápění se v Brně stará společnost Teplárny Brno, a.s., založená v roce 1992. Během své existence společnost několikrát změnila vlastníka, ale od roku 2009 je jediným vlastníkem statutární město Brno. Hlavním předmětem podnikání společnosti je výroba a rozvod tepelné energie, výroba a obchod s elektřinou a obchod s plynem. Elektřina a teplo jsou z větší části vyrobeny kogeneračním způsobem.

Společnost provozuje čtyři velké teplárenské zdroje propojené horkovodní a parovodní sítí. Mezi tyto velké zdroje patří provozy: Špitálka, Červený mlýn, Brno-sever a Staré Brno. V okrajových částech, kde není vybudována rozvodná tepelná síť, pak společnost provozuje desítky místních plynových kotlů.

Velikost ročního prodeje elektřiny činila v roce 2012 přibližně 354 GWh a 4274 TJ tepla. Jako hlavní palivo využívají zdroje brněnských tepláren zemní plyn (93,6 %), v menší míře těžký topný olej (5,7 %) a dřevní štěpku [8].

3.1 Historie brněnského teplárenství

Brno patří k prvním městům, kde byla realizována kombinovaná výroba tepla a elektřiny, čímž se zapsalo do historie teplárenství. Průkopníkem této myšlenky byl profesor Ing. Vladimír List. Jeho myšlenka podložená výpočty, že při kombinované výrobě se palivo využije s 80% účinností místo dosavadních 30 % při oddělené výrobě, přesvědčila o správnosti výstavby. A tak 1. 4. 1929 byla zahájena výstavba první teplárny v Brně a po 20 měsících byla postavena a uvedena do provozu teplárna na Špitálce. V důsledku toho mohlo dojít k odstranění 68 komínů, což dopomohlo ke snížení znečištění ovzduší.

V roce 1956 se připravovala výstavba sídlišť Žabovřesky a Královo Pole. Proto se rozhodlo o výstavbě dalšího teplárenského zdroje Červený mlýn, jehož palivem mělo být hnědé uhlí [12]. Tato výtopna byla uvedena do provozu v roce 1966, kdy k dodávce tepla využívala dvou kotlů. Důvodem nahrazení původní výtopny novým zdrojem bylo rozhodnutí, že do roku 1997 budou všechny uhelné zdroje nevyhovující emisním limitům nahrazeny novými zařízeními spalujícími zemní plyn. V roce 1995 bylo nutno vyřešit, jakým zdrojem nahradit původní zdroj o výkonu 139 MW_t a účinností 75 % [13]. V roce 1996 byl provoz výtopny ukončen. Původní technologie byla natolik opotřebovaná a zastaralá, že její rekonstrukce na spalování zemního plynu nebyla výhodná. Výtopna ČM byla posledním zdrojem spalujícím uhlí v Brně. Po důkladné analýze se Teplárny Brno rozhodly pro vybudování teplárny pracující v paroplynovém cyklu. A tak v listopadu 1999 byl na jejím místě spuštěn stávající paroplynový provoz [12].

Historické milníky brněnského teplárenství [14]

1924	Prof. Ing. List přichází s iniciativním návrhem výstavby zdroje na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny v Brně.
1927	Konečné rozhodnutí, s jakými parametry bude Brněnská teplárna pracovat, a výběr budoucího dodavatele technického zařízení (I. Brněnská, Škodovy závody), vykoupení pozemku určeného ke stavbě teplárny na Špitálce.
1929	Zahájení výkopu pro základy teplárny na bažinatém terénu, do kterého muselo být pro zpevnění zabudováno na 7000 pilot o délce 7 m a průměru 25 cm.
1929–1930	Výstavba dvou hlavních parních vývodů, větev „Sever“, větev „Jih“ a napojení okolních odběratelů.
1930	Uvedeny do provozu čtyři kotle o celkovém výkonu 185 t/h, parovodem o délce 5,6 km byly zahájeny pravidelné dodávky tepla pro 8 odběratelů, během dvou let se jejich počet zvýšil na 29.

1944–1945	Poškození budov teplárny při bombardování a osvobození Brna.
1945	Rychlá oprava a zprovoznění již počátkem května tak, aby se život ve městě mohl vrátit k normálu.
1947–1950	Výstavba třetího parního vývodu, větev „Tábor“.
1951–1953	Výstavba prvního horkovodního napáječe, čtvrté větve „Juliánov“.
1949–1955	Rozšíření stávající teplárny Špitálka (dvě protitlaké turbíny, dvě kondenzační turbíny), výstavba nové administrativní budovy, šaten, dílen údržby a skladu materiálu.
1958	Částečná plynofikace.
1962	Uvedení do provozu špičkové parní výtopny Staré Brno o výkonu 36 MW.
1966	Uvedení do provozu horkovodní výtopny Červený mlýn o výkonu 134 MW.
1971–1975	Zahájení výroby provozu Brno-sever.
1975	Došlo k ničivému požáru teplárny Špitálka, který si vyžádal i lidské oběti, vláda rozhodla (konečně, po četných urgencích ze strany vedení teplárny) o přechodu ze spalování nebezpečného černouhelného prachu na spalování plynu.
1992	Privatizace – vznik společnosti Teplárny Brno, a.s.
1993	Rekonstrukce výtopny Staré Brno a změna paliva z uhlí na zemní plyn, změna názvu společnosti z Teplárny a.s. Brno na Teplárny Brno, a.s.
1996	Ukončen provoz posledního uhelného zdroje Červený mlýn.
1997	Dokončena ekologizace stávajících plynových kotlů K28 a K29 s výkonem 100 tun páry/h v provozu Špitálka za účelem snížení emisí NO _x .
1999	Zprovoznění nově vybudované paroplynové teplárny Červený mlýn o elektrickém výkonu 95 MW a tepelném výkonu 140 MW.



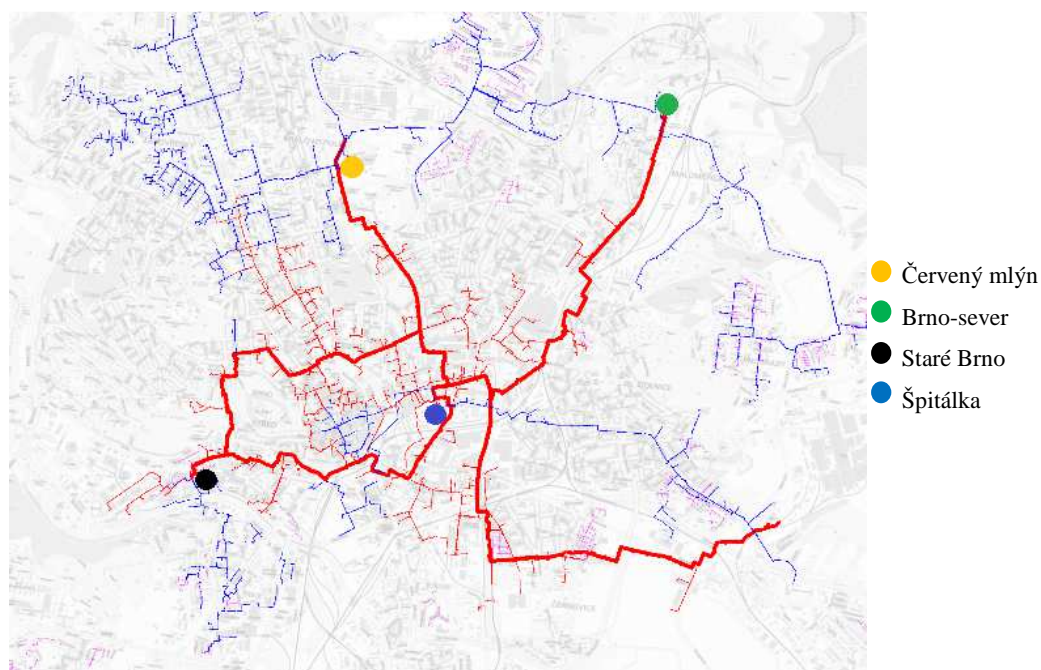
Obr. 11 Archivní fotky stavby provozu teplárny v Brně na Špitálce [14]

3.2 Soustava zásobování tepelnou energií v Brně

Soustava zásobování tepelnou energií v Brně je v současnosti tvořena čtyřmi velkými zdroji (Špitálka, Brno-sever, Staré Brno a Červený mlýn) a mnoha menšími zdroji ve vlastnictví brněnských tepláren. Tyto zdroje jsou rozmístěny tak, aby pokrývaly potřeby Brňanů a pracovaly efektivně s co možná nejmenšími tepelnými ztrátami v rozvodech. Sít' tepelných rozvodů je velmi sofistikovaná a propracovaná (obr. 12).

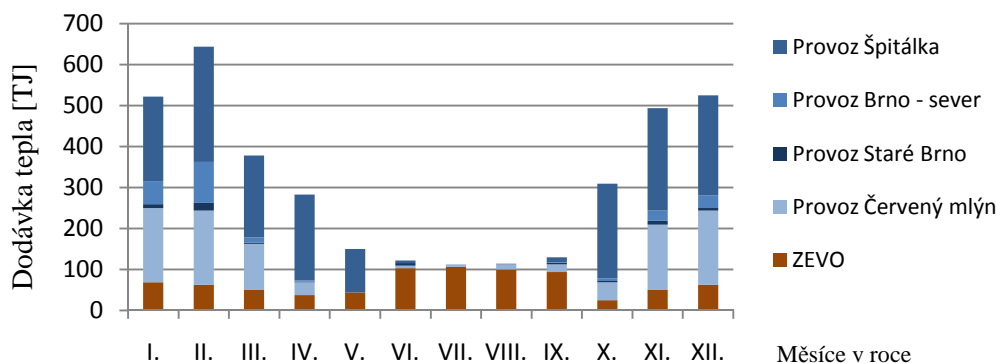
Od počátku teplárenství se v Brně dochovalo velké množství parních sítí, sloužících k dodávce tepla pro obyvatele. Z důvodu vysokých ztrát při provozování těchto zastaralých parních sítí se v roce 2010 Teplárny Brno rozhodly zahájit rekonstrukci těchto sítí na modernější horkovodní sítě. V letech 2010 a 2011 bylo v historickém centru města kolem Moravského náměstí vybudováno přes čtyři kilometry nových horkovodních rozvodů. Jen v roce 2010 investovaly Teplárny Brno do výměny parovodních rozvodů za horkovodní téměř 80 milionů Kč. Realizace všech etap přestavby parních rozvodů na horkovodní v Brně je naplánována do roku 2019. Celková délka nových rozvodů by měla dosáhnout 18 km, přičemž celkové náklady na výměnu parovodů přesáhnou půl miliardy korun [7].

V roce 2011 tvořilo tepelnou síť v Brně 96 km parovodů, 65 km kondenzačních potrubí a 2 x 94 km horkovodních sítí. Tyto sítě zásobují teplem přes 92 000 domácností a řadu podnikatelských subjektů, což představuje celých 60 % celkové potřeby tepla [15]. Samotná teplárna ČM pak zásobuje v zimním období horkou vodou o parametrech 2,5 MPa a 130/70 °C o celkovém výkonu 115 MW_t městské části Žabovřesky a Královo Pole. V přechodovém období (jaro, podzim) pak zásobuje i sídliště na Lesné, v Líšni a na Vinohradech.



Obr. 12 Soustava zásobování teplem energií v Brně [15]

Velkou výhodou centrální soustavy je vzájemné propojení zdrojů tepelné energie za pomoci parovodů a horkovodů, čímž může být chod jednoho zdroje zastoupen chodem jiného, ať v případě odstávky nebo neočekávaného výpadku. Systém umožňuje i připojení spalovny komunálního odpadu (ZEVO) společnosti SAKO Brno, a.s., která pokrývá takřka veškeré tepelné potřeby města Brna v nejteplejším období roku. Obr. 13 znázorňuje množství tepla dodaného jednotlivými zdroji do SZTE během roku. Díky parovodu (D_N 500) spojujícím provozy Červený mlýn a Špitálka má ČM možnost odběru páry o parametrech (0,9 MPa a 190 °C) sloužící k dodávce tepla, když je spalínový kotel mimo provoz (v letním období). V této době se teplárna ČM dělí na „část elektrárenskou“, s pohotovostí spalovací turbíny, a „část teplárenskou“, v níž jsou v provozu ohřívačky sloužící k dodávce tepla pro sídliště Líšeň a Lesná.



Obr. 13 Dodávky tepla SZTE jednotlivými zdroji v průběhu roku [15]

4 Teplárna Červený mlýn

Teplárna Červený mlýn (TČM, viz obr. 14) je nejnovějším zdrojem ve vlastnictví Tepláren Brno, a.s. a patří mezi nejmodernější paroplynové zdroje v ČR. Tento teplárenský provoz se vyznačuje velmi efektivní kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. Teplo je do soustavy dodáváno ve formě páry a horké vody. Vyrobená elektřina je dodávána do elektrizační soustavy. Zařízení, které se nachází v katastrálním území Ponava městské části Královo Pole, bylo uvedeno do provozu v listopadu 1999. Schéma teplárny je zobrazeno v příloze 1.



Obr. 14 Teplárna Červený mlýn [15]

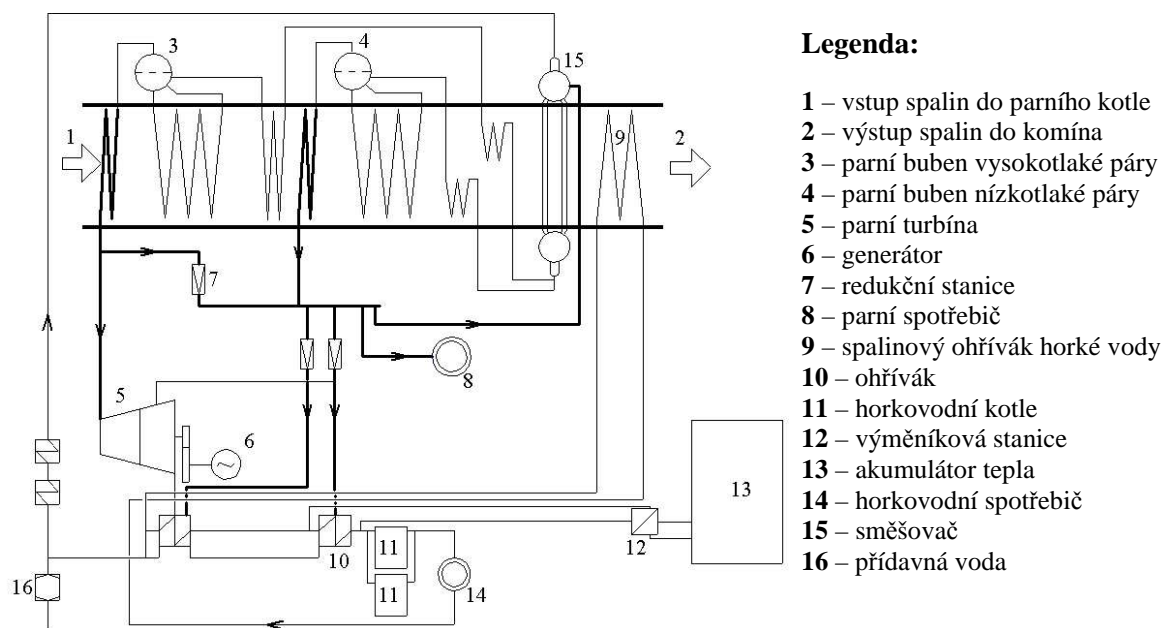
Projekt TČM uvažoval celoroční provoz paroplynového bloku. Následné změny cenových relací paliv a energií vedly k výraznému snížení odběru tepla, a tím se stal letní provoz teplárny neefektivním. V letním období (od dubna do konce října) se proto teplárna využívá jako minutová záloha (MZ15+), zatímco v zimním období (od listopadu do konce března) je v provozu celý paroplynový cyklus. Životnost teplárny je plánována do roku 2030 [13].

Aby bylo možné využívat jako záložní palivo lehký topný olej (LTO), byla v roce 1997 rekonstruována vlečka a postaven zásobník na LTO o objemu 5000 m³. V současné době se nicméně LTO jako palivo z ekologických důvodů i vzhledem k vysokým cenám srovnatelným s cenou zemního plynu již nevyužívá.

4.1 Popis zařízení

V provozu Červený mlýn je instalován paroplynový cyklus s maximálním tepelným výkonem 140 MW_t a s celkovým elektrickým výkonem 95 MW_e. Základní blok výroby tvoří spalovací turbína V 64.3A s provozním označením TG 10 o výkonu 71 MW_e, spalínový kotel označení K3 a parní protitlaká turbína s označením TG 20 o elektrickém výkonu 24 MW_e. Celkový tepelný výkon 140 MW_t je zajišťován dvěma horkovodními kotli spolu s parní částí provozu (obr. 15), která se skládá ze spalínového kotle a parní turbíny. Výkon 140 MW_t se dělí na dodávku tepla prostřednictvím horké vody (125 MW_t) a páry (15 MW_t). Při maximálním výkonu se ve spalínovém kotli vyprodukuje pára o množství přibližně 100 t/h s parametry 6,4 MPa a teplotě 495 °C. Horkovodní plynové kotle s označením K1 a K2, každý o jmenovitém výkonu 27 MW_t, byly uvedeny do provozu již před modernizací. Během modernizace sloužily pro pokrytí dodávek tepla. Nyní slouží jako záložní, respektive špičkové, zdroje tepla k ohřevu oběhové vody na požadovanou teplotu a k dosažení potřebného výkonu teplárny. V případě odstavení paroplynového cyklu pracují kotle samostatně a dodávají teplo do SZTE [16].

Účinnost výroby elektrické energie v rámci paroplynového cyklu je 47,5 %. Modul teplárenské výroby elektřiny (rov. 1) dosahuje při maximálním výkonu teplárny (tj. 94 MW_e plynové a parní turbíny a 100 MW_t tepla získaného ze spalínového kotle) hodnoty $\sigma = 0,94$. Tato hodnota je na spodní hranici hodnot pro paroplynový cyklus. To je ale dáno volbou protitlaké parní turbíny, která předurčuje využití zdroje především pro teplárenské účely, a to má naopak pozitivní vliv na celkovou účinnost zdroje, která dosahuje hodnoty 89 %.



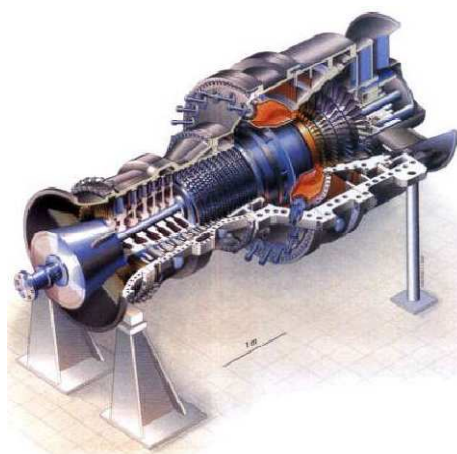
Obr. 15 Zjednodušené schéma parní části teplárny Červený mlýn (podle [17])

4.1.1 Řídicí systém

Pro teplárnu Červený mlýn dodala firma Siemens řídicí systém TELEPERM XP, který tvoří komplexní celek pro obsluhu technologického a elektrotechnického zařízení provozu, kontrolu a archivaci dat. Provozní data jsou dlouhodobě archivována pro pozdější analýzu provozu nebo k případnému vyhodnocení poruchových stavů. V dozorně je operátorské pracoviště se dvěma rovnocennými operátorskými stanicemi [16].

4.1.2 Plynová turbína V64.3A

Spalovací turbosoustrojí disponuje spalovací turbínou V64.3A od společnosti Siemens (obr. 16). Turbína je jednohřídelová, vysokootáčková a jednotělesová, určená pro těžké pracovní podmínky. Její vytížení se pohybuje mezi 2500 až 3000 hodinami za rok. Turbína je vybavena prstencovou spalovací komorou se 24 hybridními palivovými hořáky (patentovanými společností Siemens). Jako primární palivo využívá zemní plyn, ale hybridní hořáky umožňují spalování i lehkého topného olej (LTO). Na studeném konci turbíny je umístěn dvoupólový synchronní generátor. Průtok vzduchu vstupující do kompresoru spalovací turbíny je proměnný, řízený natáčivými rozváděcími lopatkami prvního stupně kompresoru. Řízení průtoku vzduchu slouží k nastavení optimálního režimu spalování a k dosažení stabilní teploty spalin na výstupu z turbíny. Turbína je dodatečně vybavena akustickým krytem pro snížení hlukové zátěže tak, aby nepřesahovala 59 dB. Místnost se spalovací turbínou je vybavena hasicím zařízením, které v případě požáru vpustí pod kryt CO_2 [16].



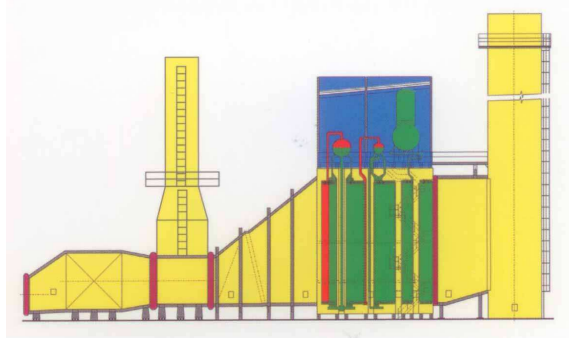
Obr. 16 Plynová spalovací turbína V64.3A [16]

Tab. 5 Parametry plynová spalovací turbína V64.3A [16]

Parametry plynové spalovací turbíny V64.3A	
Jmenovitý výkon při spalování ZP	70 MW _e
Kompresní poměr	16,7
Výstupní teplota spalin	Cca 575 °C
Teplota okolí	4 °C
Účinnost	36,2 %
Otáčky turbíny	5413 min ⁻¹
Otáčky generátoru	3000 min ⁻¹

4.1.3 Spalinový kotel

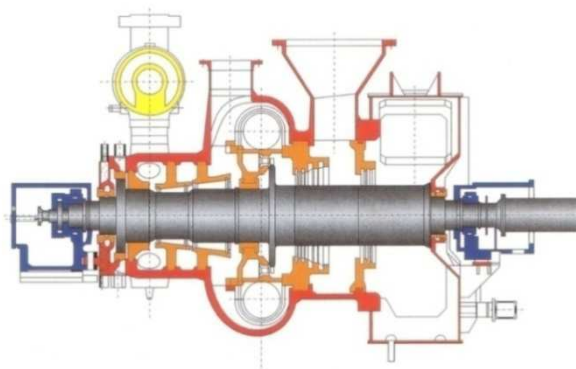
Spalinový kotel má výkon 100 MW_t. Je horizontálního provedení bez přitápění, ovšem dodatečná montáž umožňuje instalaci mřížového hořáku o výkonu až 15 MW_t. V průřezu kotle, kterým proudí spaliny, jsou zavěšeny potrubní svazky teplosměnných ploch. Kotel je určen pro využití tepla spalin vystupujících z plynové turbíny k výrobě přehřáté páry a ohřevu vody v horkovodní soustavě. Přívodní kanál spalin obsahuje tlumič hluku a by-passovou klapku. Parní kotel se skládá z vysokotlakového (VT) a nízkotlakového (NT) parního okruhu a parního okruhu pro odplynění. VT část kotle vyrábí přehřátou páru, která slouží k pohonu parní turbíny a je provozována s klouzavými parametry (3,0 až 6,4 MPa a 420 až 495 °C) v závislosti na výkonu plynové turbíny. NT část pak vyrábí přehřátou páru o nižších parametrech (0,90 MPa a 190 °C). [16].



Obr. 17 Spalinový kotel [16]

4.1.4 Parní protitlaká turbína GE 40

Parní protitlaká, dvoutlaková turbína s typovým označením GE 40 byla vyrobena firmou Siemens. Turbína je konstruována jako jednotělesová, vysokootáčková s jedním regulovaným a jedním neregulovaným odběrem páry. Turbína je provozována s klouzavými parametry VT páry (3,0 – 6,4 MPa). NT pára vstupuje do turbíny přes regulovaný odběr. V případě požadavku může být pára z regulovaného odběru využita k dodávce tepla prostřednictvím páry do SZTE (0,90 MPa a 190 °C). Pára z neregulovaného odběru se využívá jako topné médium pro špičkový ohřívák. V případě výpadku turbíny je VT pára z kotle odváděna přes VT redukční stanici do ohříváků oběhové vody. Veškeré teplo obsažené v páře je po expanzi v parní turbíně využito k dodávce tepla do SZTE díky ohřívákům oběhové vody [16].



Obr. 18 Parní protitlaká turbína typ G40 [16]

Tab. 6 Parní turbína typ G40 [16]

Parametry parní turbíny GE 40	
Jmenovitý výkon turbíny	24 MW _e
Stav VT páry (tlak/teplota/maximální průtok)	6,2 MPa / 495 °C / 25,8 kg·s ⁻¹
Stav přídavné NT páry (tlak/teplota/maximální průtok)	0,9 MPa / 210 °C / 4,5 kg·s ⁻¹
Výstupní stav páry (tlak/průtok)	0,063 MPa / 13,65 kg·s ⁻¹
Otáčky turbíny	6040 min ⁻¹
Otáčky generátoru	1500 min ⁻¹

4.1.5 Akumulace tepla

Rozdíl mezi okamžitou spotřebou tepla a aktuálním tepelným výkonem během dne (časový posun denních špiček) je vyrovnáván akumulací tepla ve vertikální nádrži o objemu 5600 m³ (obr. 19), s kapacitou až 185 MWh tepla. V okruhu akumulace se nachází čtyři paralelní deskové výměníky o celkovém tepelném výkonu 60 MW_t. Teplota vody nabitého akumulátoru je kolem 95 °C, teplota vybitého akumulátoru je v rozmezí 55 až 70 °C. Významnou součástí akumulčního systému jsou akumulční čerpadla, která zajišťují požadovaný průtok výměníky dle požadavku na vybíjení nebo nabíjení. Akumulace tepla také chrání spalovací turbínu, neboť časté najíždění a odstavování turbíny zkracuje její životnost [16].



Obr. 19 Nádrž na akumulaci tepla [18]

4.1.6 Rozvodna 110 kV

Pro transformaci vyrobené elektrické energie slouží v teplárně Červený mlýn zapouzdřená rozvodna 110 kV. Z ní je elektřina vedena dvěma vedeními do oblasti IBC (Příkop) a do rozvodny Medlánky, kde dochází k napojení na elektrickou soustavu. Pro záložní napájení vlastní spotřeby je použit přívod z rozvodny 22 kV společnosti E.ON [16].



Obr. 20 Rozvodna 110 kV [16]

4.2 Palivo

4.2.1 Zemní plyn

Produkce zemního plynu v České republice je minimální. Těžba probíhá v malém měřítku pouze v jihomoravském kraji a zdaleka nedostačuje k pokrytí celorepublikové spotřeby, proto je nutno zemní plyn dovážet. Děje se tak prostřednictvím dvou plynovodů (z Ruska a Norska). Rozvodem plynu po ČR se zabývá firma RWE Transgas, a.s., která dále prodává plyn regionálním distribučním společností.

Teplárna ČM jako většina paroplynových cyklů využívá jako primární zdroj energie zemní plyn, jenž je pro spalovací turbínu odebírán z vysokotlaké distribuční sítě JMP, a.s. a dále ze středotlaké distribuční sítě, která slouží jako záloha pro horkovodní kotle. Ve vysokotlaké regulační stanici je zemní plyn regulován na provozní tlak pro spalovací turbínu a horkovodní kotle a poté veden z filtrační stanice přes úsek měření průtokovu, přehřev, dvojici regulátoru s rychlouzávěrem a potrubní můstek do strojovny spalovací

turbíny. Používaný zemní plyn má průměrnou výhřevnost $33,8 \text{ MJ/m}_N^3$ při obsahu síry cca $1,5 \text{ mg/m}_N^3$. Průměrná roční spotřeba činí okolo 59 mil. m_N^3 . Při maximálním výkonu dokáže teplárna spálit až 28 000 m_N^3 za hodinu [16].

4.2.2 Lehký topný olej

Jistou nevýhodou při využívání zemního plynu jako paliva je snížení energetické nezávislosti ČR. Produkce plynu na světě je zajištěna na delší dobu dopředu, a proto by neměly být obavy z nedostatku.

V případě delšího výpadku dodávek zemního plynu je však možno v teplárně ČM použít jako náhradní palivo lehký topný olej (LTO) s výhřevností cca 41 MJ/m_N^3 . Ten je skladován v nadzemní nádrži o objemu cca 5000 m^3 (obr. 21), která je zásobována železniční vlečkou. Nádrž je umístěna v ocelové havarijní jímce, která má schopnost zachycení celého objemu nádrže v případě havárie [16].

V minulých letech však cena topného oleje na trhu výrazně stoupla, proto není žádoucí jej využívat [15]. Tato varianta provozu byla v teplárně ČM použita pouze při garančních testech, od té doby se nevyužívá, a proto je zásobník prázdný.



Obr. 21 Zásobník lehkého topného oleje [18]

4.5 Výroba elektřiny

Paroplynové cykly v kogeneračním provozu jsou navíc důležité pro dodávky regulační elektřiny, jenž slouží k regulaci energetické sítě. Ta je enormně zatěžována mimo jiné vlivem zapojení fotovoltaických elektráren u nás a transitu proudu ze severoněmeckých větrných elektráren [8]. Právě díky paroplynovým cyklům, které zvládnou rychlý náběh během několika desítek minut, je možné tyto výkyvy pokrýt.

Jedním ze zdrojů, které poskytují podpůrné služby elektrizační soustavě, je i paroplynová teplárna Červený mlýn. Podpůrné služby (PpS) jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Pomocí PpS je možno korigovat rozdíly mezi odběrem a výrobou, a to změnami spotřeby či výkonů výroby [19].

Teplárna ČM poskytovala pro společnost ČEPS, a.s., která je provozovatelem přenosové soustavy v ČR, od roku 2003 dispečerskou zálohu s aktivací na plný výkon do 90 min. Po udělení certifikačních protokolů pro podpůrné služby zde byl instalován terminál energetického objektu, který umožňuje řízení výkonu teplárny z dispečinku ČEPS v Praze [16].

Od roku 2004 slouží teplárna ČM jako záložní zdroj pro ČEPS i během letního období. Umožnila to výstavba by-passového komínu mezi plynovou turbínou a spalínovým kotlem, čímž se provoz samotné plynové turbíny stal nezávislým na spalínovém kotli. Náklady na výstavbu by-passového komínu činily cca 45 mil. Kč, zatímco zisk za pouhý rok provozování dispečerské zálohy se pohyboval okolo 150 mil. Kč [19]. Teplárna ČM je nyní certifikována na podpůrné služby MZ15± a SR, přičemž v zimním období poskytuje služby MZ15± a SR a v letním období pouze MZ15+ ze stojícího stroje.

Podpůrné služby MZ15± (minutové zálohy) jsou poskytovány zařízeními připojenými k elektrizační soustavě České republiky, které jsou do 15 minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopny poskytnout sjednanou regulační zálohu. Minutovou zálohou se rozumí požadovaná změna výkonu, kladná nebo záporná, na svorkách poskytujícího zařízení. Regulační minutová

záloha záporná MZ15- může být realizována například snížením výkonu bloku nebo připojením odpovídajícího zatížení k ES ČR. Minimální velikost minutové regulační zálohy MZ15 je 10 MW_e, maximální výkon zařízení je 70 MW_e [19].

Služba sekundární regulace výkonu bloku (SR) je proces změny hodnoty výkonu regulovaného elektrárenského bloku, tak jak je požadováno sekundárním regulátorem frekvence. Kvalita této podpůrné služby je posuzována podle velikosti nabízeného rozsahu a rychlosti zatěžování. Podpůrná služba SR výkonu bloku je zprostředkována pomocí změny požadované hodnoty výkonu bloku. Pro tuto regulaci musí být v rámci výkonu bloku vyčleněn výkon – sekundární regulační záloha, jejíž velikost závisí na technologických vlastnostech bloku. Celou velikost sekundární regulační zálohy musí být blok schopen realizovat do 10 minut od požadavku [19].

Do budoucna se uvažuje, že v případě „blackoutu“ by mohla teplárna ČM sloužit i jako ostrovní zdroj pro pokrytí dodávky elektřiny v městě Brně.

4.6 Ekologie a emise

Takřka veškerá výrobní zařízení společnosti Teplárny Brno, a.s. spalují zemní plyn. Provoz Brno-sever v Maloměřicích spaluje vedle zemního plynu také těžký topný olej a provozovna Teyschlova 33 v Brně Bystři provozuje 2 kotle na dřevní štěpku.

V roce 2006 byla na základě zákona č. 76/2003 Sb. o integrované prevenci vydána třem provozům (Špitálka, Brno-sever, Červený mlýn) integrovaná povolení, která určují emisní limity, jež jsou ještě přísnější než limity dané legislativně (viz tab. 7). Emisní hodnoty u těchto zdrojů jsou kontinuálně monitorovány a kontrolováno plnění limitů. Postupem času však dochází k jejich zpřísnění, a tak bude stále obtížnější stanovené limity plnit [13].

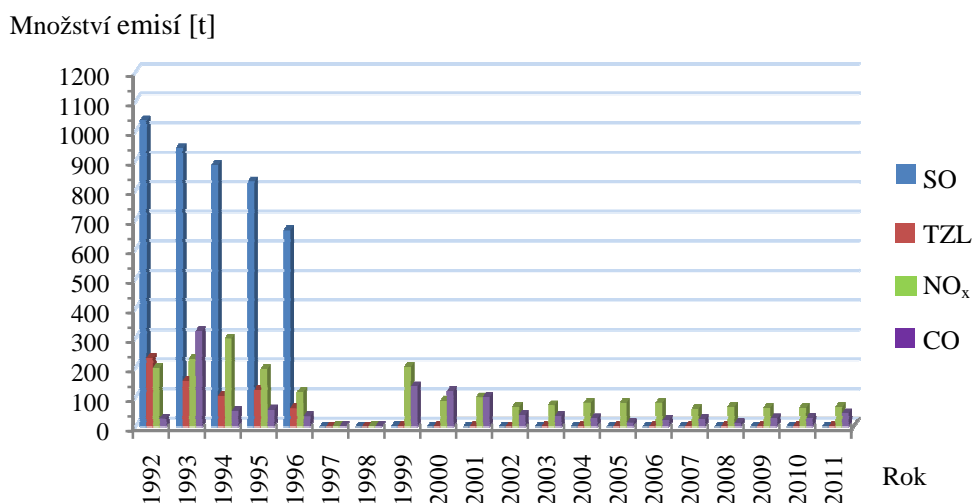
Tab. 7 Emisní zdroj ČM – paroplynový cyklus s kotlem K3(palivo zemní plyn) [15]

Emisní zdroj	Znečišťující látka	Emisní limit [mg/m ³]
Spalovací turbína TG 10 a spalinový kotel K3	TZL	10
	SO ₂	20
	NO _x	150
	CO	100

Před modernizací patřila výtopna Červený mlýn, spalující uhelný hruboprach, k největším znečišťovatelům ovzduší tuhými znečišťujícími látkami a oxidy síry v Brně. Nahrazením tohoto zdroje paroplynovou teplárnou spalující zemní plyn došlo k významné redukci emisí tuhých znečišťujících látek, oxidů dusíku (NO_x), oxidu uhelnatého (CO) a úplnému vyloučení emisí oxidu siřičitého (SO₂). To potvrdily i naměřené hodnoty a teplárna nyní splňuje ty nejprísnejší emisní limity. Porovnání množství vyprodukovaných emisí TZL, NO_x, CO a SO₂ původní výtopny na hnědé uhlí a nového paroplynového zdroje na zemní plyn je uvedeno v obr. 22.

V současnosti jsou emise do ovzduší vypouštěny prostřednictvím dvou komínů – železobetonovým o výšce 45 m nebo by-passovým o čtyři metry menším, postaveným v roce 2004. Emisní hodnoty NO_x a CO jsou kontinuálně měřeny při výstupu z plynové turbíny a data shromažďována. Emise tuhých znečišťujících látek a SO₂ jsou stanoveny výpočtem pomocí emisních faktorů. Nejen modernizace, ale i využívání nízkoemisních hořáků při spalování výrazně snížilo produkci emisí, což dopomohlo k významnému ozdravení ovzduší v Brně.

Pozitivní vliv na životní prostředí má poskytování PpS, jelikož TČM svým disponibilním výkonem 48 MW_e (při MZ15+) nahrazuje odpovídající „tepelnou zálohu“, která by byla udržovaná v pohotovosti pro případ nerovnováhy v elektrizační soustavě a byla by tak trvalým producentem emisí.



Obr. 22 Produkce emisí vstupujících do ovzduší – teplárna Červený mlýn [16]

4.7 Hodnocení úspory paliva a energetické hodnocení

Parametry teplárny Otrokovice (palivo hnědé uhlí):

Teplárenský modul	$\sigma = 0,167$	[21]
Celková účinnost teplárny	$\eta_c^T = 0,87$	[21]
Účinnost porovnávací elektrárny na hnědé uhlí	$\eta_e^{el} = 0,38$	[21]
Účinnost porovnávací výtopny na hnědé uhlí	$\eta_q^v = 0,80$	[21]

Výpočet:

Úspora fosilního paliva Δq oproti oddělené výrobě

$$\Delta q = 1 - \frac{\eta_e^{el} \cdot \eta_q^v}{\eta_c^T} \cdot \frac{\sigma + 1}{\sigma \cdot \eta_q^v + \eta_e^{el}} = 1 - \frac{0,38 \cdot 0,8}{0,87} \cdot \frac{0,167 + 1}{0,167 \cdot 0,8 + 0,38} = 0,2060 \quad (6)$$

Parametry teplárny ČM (palivo zemní plyn):

Teplárenský modul	$\sigma = 0,94$	
Celková účinnost teplárny	$\eta_c^T = 0,89$	
Účinnost porovnávací elektrárny na zemní plyn	$\eta_e^{el} = 0,55$	[21]
Účinnost porovnávací výtopny na zemní plyn	$\eta_q^v = 0,90$	[21]

Výpočet:

Úspora fosilního paliva Δq oproti oddělené výrobě

$$\Delta q = 1 - \frac{\eta_e^{el} \cdot \eta_q^v}{\eta_c^T} \cdot \frac{\sigma + 1}{\sigma \cdot \eta_q^v + \eta_e^{el}} = 1 - \frac{0,55 \cdot 0,9}{0,89} \cdot \frac{0,94 + 1}{0,94 \cdot 0,9 + 0,55} = 0,2271 \quad (6)$$

Z výpočtu pro úsporu paliva vyplývá, že celková úspora paliva teplárny Červený mlýn (spalující zemní plyn) je oproti oddělené výrobě 22,7 %. Pro teplárnu Otrokovice (spalující hnědé uhlí) tato úspora činí 20,6 %. Rozdíl lze přisoudit vyššímu teplotenskému modulu u teplárny Červený mlýn, který využívá většího podílu vyrobené elektrické energie.

Energetická výhodnost paroplynového cyklu

- 1) Paroplynový cyklus v teplárně ČM je v porovnání s hnědouhelnou teplárnou v Otrokovicích z energetického pohledu výhodnější, neboť dosahuje vyšší tepelné účinnosti a to o 2% body.
- 2) Paroplynová teplárna Červený mlýn má i vyšší podíl výroby elektrické energie, čehož je znakem větší hodnota teplotenského modulu.
- 3) Výhodnost paroplynového cyklu v teplárně ČM spočívá i v poskytování podpůrných služeb pro přenosovou soustavu.

5 Závěr

Snahou současné doby je maximální využívání fosilních paliv. Z tohoto pohledu patří kogenerace s využitím paroplynového cyklu k nejúspěšnějším řešením, které dokáže uspořit až 1/3 paliva oproti oddělené výrobě tepla a elektřiny. Dobu ekonomické návratnosti rekonstrukce na paroplynový teplárenský cyklus se u teplárny Červený mlýn nepodařilo určit z důvodu nedostupnosti bližších údajů o jejich investičních nákladech. Z výše uvedených výpočtů nicméně vyplývá, že úspora paliva činí u teplárny Červený mlýn (spalující zemní plyn) až 23 % a u teplárny Otrokovice (spalující hnědé uhlí) přibližně 21 %. Během příštích let se navíc očekává další vývoj spalovacích turbín s postupným zvyšováním výstupních teplot až na 1500 °C, a tím i zvýšení čisté tepelné účinnosti paroplynových oběhů až na 60 % [10].

Jistou nevýhodou u paroplynových cyklů spalujících pouze zemní plyn je jejich závislost na dodávce plynu ze zahraničí. Spalovací hořáky v teplárně ČM proto umožňují spalování dvou druhů paliv, a to zemního plynu a lehkého topného oleje. To poskytuje teplárně výhodu v podobě nezávislosti provozu na dodávce jednoho druhu paliva.

Využití dynamických vlastností spalovací turbíny rovněž umožňuje paroplynové teplárně Červený mlýn poskytovat společnosti ČEPS podpůrné služby, které slouží ke stabilizaci elektrizační soustavy. Služba MZ15+ je využívána zejména během čtyřměsíční letní odstávky. Pro tento účel byl v TČM mezi spalovací turbínu a spalínový kotel instalován by-passový komín. Jistou perspektivou do budoucna je rovněž uplatnění zdroje v případě „blackoutu“, kdy by teplárna mohla v ostrovním režimu dodávat elektrickou energii do Brna a okolí.

V dnešní době je zapotřebí dbát i na životní prostředí, jehož jsme součástí. Modernizace výtopny Červený mlýn byla z tohoto hlediska nutná, neboť zastaralá výtopna byla velkým zdrojem tuhých znečišťujících látek a oxidů síry v Brně. Po modernizaci se produkce emisí výrazně snížila, a to oproti roku 1995 produkce emisí CO₂ o 48 %, emisí NO_x o 66 % a tuhých znečišťujících látek o 99 %. Navíc došlo k úplnému odstranění produkce SO₂. To vše mělo pozitivní vliv na brněnské ovzduší. Ekologický přínos teplárny je i v poskytování služeb elektrizační soustavě, protože rychlý start provozu umožňuje náhradu „tepelné zálohy“, která by musela být jinak trvale udržována pro pokrytí případných výkyvů a byla by tak dalším zdrojem emisí.

V brněnské soustavě zásobování tepelnou energií se v současné době využívá k dodávce tepla horkovodní soustava s předizolovaným potrubím s minimálními tepelnými ztrátami a předávacími stanicemi s deskovými výměníky tepla, které se vyznačují velkou účinností. Roli hrají i akumulční nádrže pro efektivní pokrytí tepelných potřeb (v době přebytku jinak nevyužitého tepla). Horkovodní systém je postupně rozšiřován a modernizován.

Celkově lze říci, že paroplynový cyklus v TČM je výjimečný svou vysokou provozní disponibilitou, výkonem, úsporou primárního paliva i šetrností k životnímu prostředí. Na druhou stranu jsou tyto výhody vyváženy potřebou ušlechtilého fosilního paliva pro provoz spalovací turbíny. Snaha je do budoucna dále zvyšovat termickou účinnost tepelných oběhů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Tscr.cz [online]. 2012 [cit. 2013-01-30]. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Dostupné z WWW: <<http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=0505>>.
- [2] KADRNOŽKA, Jaroslav, OCHRANA, Ladislav. *Teplárenství*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 178 s. ISBN 80-7204-222-X.
- [3] Wikipedia.org [online]. 3. 1. 2013 [cit. 2013-01-25]. Teplárna. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplárna>>.
- [4] KARAFIÁT Josef et. al. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla*. Praha 2006, 66 s. Dostupné z <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>>.
- [5] KRBEK, Jaroslav et al. *Zásobování teplem a kogenerace*. 1. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1999, 281 s. ISBN 80-214-1347-6.
- [6] Tscr.cz [online]. 2012 [cit. 2013-01-03]. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Dostupné z WWW: <<http://www.kombinovana-vyroba.cz/>>.
- [7] Tscr.cz [online]. 2012 [cit. 2013-01-08]. Statistika kombinované výroby – Evropská unie Dostupné z WWW: <<http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=151010>>.
- [8] Nechci-drahe-teplo.cz [online]. 2013 [cit. 2013-01-05]. Teplárny a kogenerační elektrárny v České republice. Dostupné z WWW: <<http://www.nechci-drahe-teplo.cz/teplarny-v-ceske-republice>>.
- [9] KADRNOŽKA, Jaroslav, SKÁLA, Zdeněk. *Paroplynové elektrárny a teplárny*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1981, 254 s.
- [10] Cez.cz [online]. 2012 [cit. 2013-01-30]. Paroplynový cyklus Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/paroplynov-elektrarny/informace-o-paroplynov-e-energetice.html>>.
- [11] DVORSKÝ, Emil, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2005, 281 s. ISBN 80-7300-118-7.
- [12] Moravskéhospodarstvi.cz [online]. 1.6.2010 [cit. 2013-02-05]. Teplárny vyrábí teplo a elektřinu už osmdesát let. Dostupné z WWW: <<http://www.moravskéhospodarstvi.cz/article/ekonomika/teplarny-vyrabi-teplo-a-elektřinu-uz-osmdesat-let/>>.
- [13] Česká republika. Rozhodnutí o integrované prevenci a omezení znečištění a o změně některých zákonů, Zákona o integrované prevenci. Brno: Odbor životního prostředí, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf>>.
- [14] Encyklopedie.brna.cz [online]. 27. 11. 2012 [cit. 2013-01-26]. Zahájení provozu brněnské teplárny. Dostupné z WWW: <http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_udalosti&load=1196&q=&>.
- [15] Teplárny.cz [online]. 2013 [cit. 2012-11-26]. Ekologie a bezpečnost. Dostupné z WWW: <<http://www.teplarny.cz/cz/ekologie-a-bezpečnost>>.
- [16] Teplárny Brno, a.s.: Firemní prospekt: Paroplynová teplárna Červený mlýn. 6 s.
- [17] transformacni-technologie.cz [online]. 2012 [cit. 2013-02-23]. Tepelná turbína a turbokompresor. Dostupné z WWW: <<http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>>.
- [18] Polycomp.cz [online]. 2013 [cit. 2013-03-24]. Teplárna Červený mlýn pro ABB Brno. Dostupné WWW: <http://www.polycomp.cz/page.php?lang=cz&f=mlyn_ref>.
- [19] Ceps.cz [online]. 2011 [cit. 2013-05-11]. Podpůrné služby. Dostupné z WWW: <<http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/Stranky/default.aspx>>.
- [20] Moderníbrno.cz [online]. 4. 12. 2006 [cit. 2012-11-27]. Teplárny pomáhají elektrizační soustavě. Dostupné z WWW: <<http://www.modernibrno.cz/aktualita.htm?aktualita=4054>>.
- [21] KADRNOŽKA, Jaroslav. Kvet-masivní a efektivní nástroj pro úsporu fosilního paliv. *3T – Teplo, Technika, Teplárenství*. 2004, č. 3, s. 9-16. ISSN 1210 6003.

Seznam použitých zkratk

ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LTO	lehký topný olej
NO _x	Oxidy dusíku
NT	Nízkotlakový parní okruh
PpS	Podpůrné služby
SO ₂	Oxid siřičitý
SZTE	Soustava zásobování tepelnou energií
TČM	Teplárna Červený mlýn
TZL	Tuhé znečišťující látky
VT	Vysokotlakový parní okruh
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu
ZP	Zemní plyn

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název
A	[J]	Práce cyklu
E	[Wh]	Energie
E_{KVET}	[J]	Elektřina vyrobená ve zdroji KVET
l	[m]	Délka
L	[dB]	Hluk
p	[Pa]	Tlak
P_e	[W _e]	Elektrický výkon
P_t	[W _t]	Tepelný výkon
Q	[J]	Teplota
Q_{spal}	[J]	Spálené teplo v cyklu
$Q_{spal\ KVET}$	[J]	Spálené teplo ve zdroji KVET
$Q_{už\ KVET}$	[J]	užitečné teplo vyrobené ve zdroji KVET
T	[°C]	Teplota
t	[s]	Čas
U	[V]	Napětí
V	[m _N ³]	Objem (normovaný)
σ	[-]	teplárenský modul
$\eta_{celk\ KVET}$	[-]	Celková účinnost zdroje KVET
$\eta_{el\ KVET}$	[-]	Účinnost výroby elektrické energie zdroje KVET
$\eta_{q\ KVET}$	[-]	Účinnost výroby užitečného tepla zdroje KVET
η_t	[-]	Termická účinnost

Seznam použitých obrázků

<i>Obr. 1</i> Znázornění parního a plynového cyklu v T-s diagramu	12
<i>Obr. 2</i> Schéma složitější teplárenské horkovodní soustavy.....	13
<i>Obr. 3</i> Diagram celkové roční potřeby tepla	15
<i>Obr. 4</i> Diagram denního zatížení elektrizační soustavy	15
<i>Obr. 5</i> Sestrojení denního diagramu trvání zatížení	16
<i>Obr. 6</i> Podíl elektřiny z KVET na celkovém vyrobeném množství v EU	18
<i>Obr. 7</i> Paroplynové zařízení P. D. Kuzminského	20
<i>Obr. 8</i> Pohled na otevřenou spalovací turbínu	20
<i>Obr. 9</i> Graf závislosti výkonu na teplotě okolí	21
<i>Obr. 10</i> Znázornění úspory paliva při KVET	24
<i>Obr. 11</i> Archivní fotky stavby provozu teplárny v Brně na Špitálce	26
<i>Obr. 12</i> Soustava zásobování teplem energií v Brně	27
<i>Obr. 13</i> Dodávky tepla SZTE jednotlivými zdroji v průběhu roku	27
<i>Obr. 14</i> Teplárna Červený mlýn	28
<i>Obr. 15</i> Zjednodušené schéma parní části teplárny Červený mlýn	29
<i>Obr. 16</i> Plynová spalovací turbína V64.3A	29
<i>Obr. 17</i> Spalinový kotel	30
<i>Obr. 18</i> Parní protitlaká turbína typ G40	30
<i>Obr. 19</i> Nádrž na akumulaci tepla	31
<i>Obr. 20</i> Rozvodna 110 kV	31
<i>Obr. 21</i> Zásobník lehkého topného oleje	32
<i>Obr. 22</i> Produkce emisí vstupujících do ovzduší – teplárna Červený mlýn	34

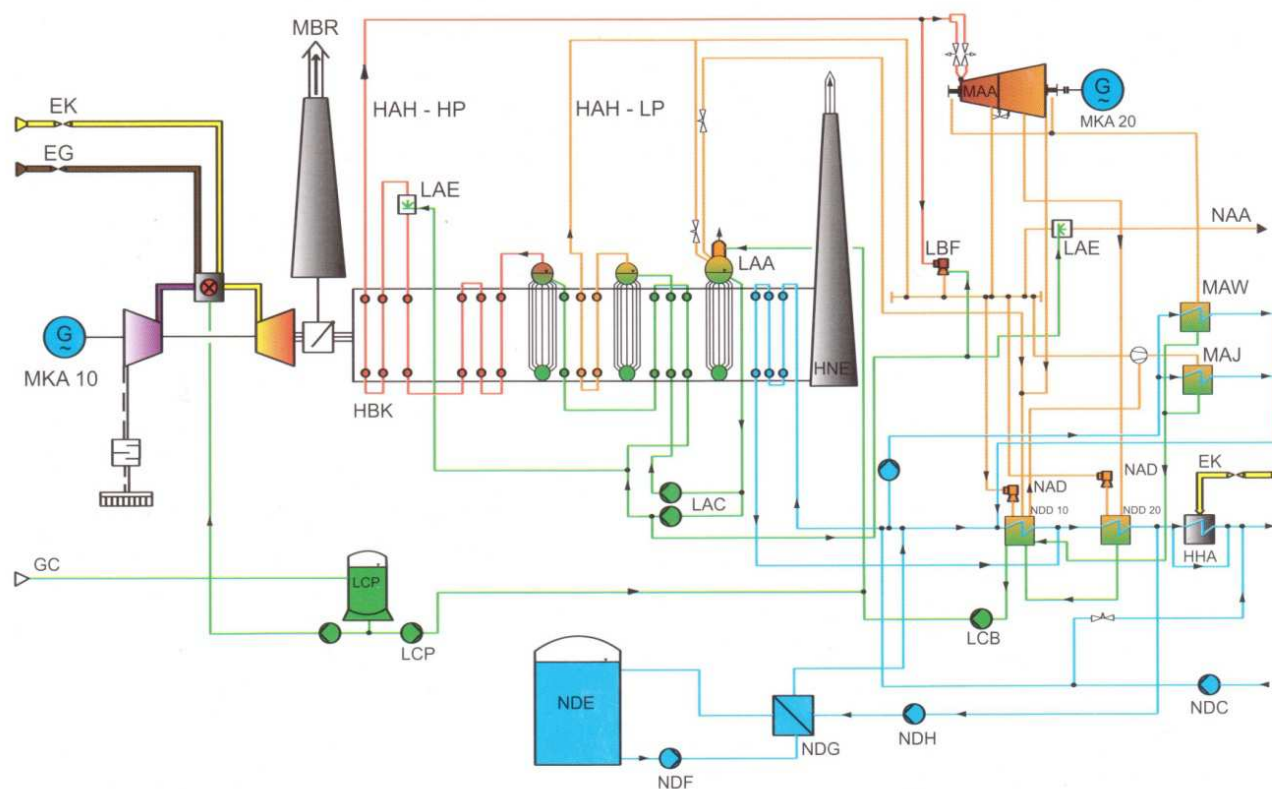
Seznam použitých tabulek

<i>Tab. 1</i> Hodnota modulu teplárenské výroby pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla	16
<i>Tab. 2</i> Přehled technologií pro KVET	17
<i>Tab. 3</i> Rozsah běžně dosahovaných účinností PPC	22
<i>Tab. 4</i> Složení a výhřevnost některých plyných paliv	23
<i>Tab. 5</i> Parametry plynová spalovací turbína V64.3A	30
<i>Tab. 6</i> Parní turbína typ G40	31
<i>Tab. 7</i> Emisní zdroj ČM – paroplynový cyklus s kotlem K3(palivo zemní plyn).....	33

Seznam použitých příloh

Příloha 1: Schéma paroplynové teplárny Červený mlýn

Příloha 1: Schéma paroplynové teplárny Červený mlýn [16]



Legenda:

EG – Zdroj lehkého topného oleje; EK – Zdroj zemního plynu; GC – Demineralizovaná voda; HAH-HP – Vysokotlaká přehřátá pára; HAH-LP – Nízkotlaká přehřátá pára; HBK – Spalinový kotel; HHA – Horkovodní kotle; HNE – Komín; LAA – Napájecí nádrž; LAC – Napájecí čerpadla; LAE – Vstřík napájecí vody pro chlazení; LBF – Vysokotlaká redukční stanice; LCB – Kondenzátní čerpadla; LCP – Zásobní nádrž a čerpadla demineralizované vody; MAA – Parní turbína; MAJ – Odsávání parovzdušné směsi; MAW – Kondenzátor ucpávkových par; MBA – Plynová turbína s kompresorem; MBL – Sací zařízení spalovací turbíny; MBR – By-passový komín s klapkou; MKA – 10 Synchronní generátor plynové turbíny; MKA – 20 Synchronní generátor parní turbíny; NAA – Vývod nízkotlaké páry do brněnského centrálního systému zásobování teplem; NAD – Nízkotlaká redukce páry; NDC – Čerpadla oběhové vody; NDD 10 – Základní horkovodní výměník; NDD 20 – Špičkový horkovodní výměník; NDE – Akumulační nádrž horké vody; NDH – Cirkulační čerpadla vloženého okruhu; NDF – Akumulační čerpadla; NDG – Akumulační výměníky